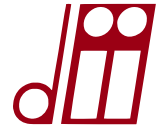


UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA



DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE
CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN
INGEGNERIA DELL'ENERGIA ELETTRICA

TESI DI LAUREA MAGISTRALE IN
INGEGNERIA ELETTRICA

Analisi di un sistema di
alimentazione innovativo per treni
ad alta velocità con l'utilizzo di
convertitori DC/DC

RELATORE: Prof. Mauro Andriollo

LAUREANDO: Devis Cattelan

ANNO ACCADEMICO 2014-15

Alla mia famiglia

Indice

1. Introduzione	1
2. Generalità sulla trazione elettrica	2
2.1. Evoluzione dei diversi sistemi di trazione elettrica	2
2.1.1. L'alta velocità	7
2.1.2. Il sistema 2x25 kV	7
2.1.3. I sistemi AV	7
3. Il sistema 3kV a corrente continua in Italia	9
3.1. Introduzione	9
3.2. Struttura generale	9
3.2.1. Le linee primarie	10
3.2.2. Le sottostazioni elettriche	11
3.2.3. La linea di contatto	36
3.2.4. Il circuito di ritorno	56
4. Analisi dei modelli utilizzati	59
4.1. Introduzione	59
4.2. Costruzione dei modelli	59
4.2.1. Linee primarie	59
4.2.2. Le sottostazioni elettriche	60
4.2.3. Linea di contatto	65
4.2.4. Circuito di ritorno	65
4.3. Analisi dei blocchi utilizzati per la costruzione dei modelli	65
4.3.1. Modello a due SSE di una tratta a doppio binario	69
4.3.2. Modello a tre SSE di una tratta a doppio binario	70
4.4. Modelli utilizzati per le simulazioni dinamiche	72
5. Simulazioni di una tratta ferroviaria con alimentazione a 3kV in corrente continua	74
5.1. Simulazioni statiche	74
5.1.1. Caso A	74
5.1.2. Caso B	78
5.2. Simulazioni dinamiche	82
5.2.1. Caso due SSE a singolo binario con $E_a = E_b = E$	82
5.2.2. Caso due SSE a singolo binario con $E_a \neq E_b$	85
5.2.3. Caso a due SSE a doppio binario con $E_a = E_b = E$	88

6. Il sistema di alimentazione 2x3kV	92
6.1. Modelli utilizzati nelle simulazioni	92
6.1.1. Modello a due SSE di una tratta a doppio binario con alimentazione 2x3 kV senza convertitore DC-DC	95
6.1.2. Modello a tre SSE di una tratta a doppio binario con alimentazione 2x3 kV senza convertitore DC-DC	96
6.2. Simulazioni statiche di una tratta con alimentazione 2x3 kV senza convertitore elettronico di potenza	98
6.2.1. Caso con due SSE	98
6.2.2. Caso con tre SSE	100
6.3. Simulazioni statiche di una tratta con alimentazione 2x3kV con convertitore DC-DC	105
6.3.1. Caso con due SSE	106
6.3.1. Caso con tre SSE	109
6.4. Simulazioni dinamiche di una tratta con alimentazione 2x3kV con convertitore DC-DC	112
6.4.1. Caso due SSE con la presenza di un carico dinamico	112
6.4.2. Caso due SSE con la presenza di due carichi dinamici	114
7. Conclusioni	116
8. Bibliografia	117

1. Introduzione

Il motivo che ha portato alla nascita della trazione ferroviaria non è quello relativo alla maggiore capacità di sopportazione di peso per asse della strada ferrata rispetto al piano stradale, ma alla riduzione degli sforzi di trazione permessa dalle rotaie. Inoltre la ferrovia presenta i consumi specifici più bassi rispetto a qualsiasi altro mezzo di trasporto pesante.

Lo sviluppo del trasporto ferroviario, col passare degli anni, si è posto l'obiettivo di raggiungere standard sempre più elevati in termini di sicurezza, velocità ed affidabilità. La soluzione migliore va sempre trovata tenendo presente aspetti tecnici ed economici.

Infatti al giorno d'oggi il panorama mondiale del trasporto ferroviario presenta diverse soluzioni tecniche. Come esempi si possono citare il sistema ferroviaria tedesco, che presenta un'alimentazione monofase a frequenza ferroviaria ($16\frac{2}{3} Hz$) con tensione nominale di 15 kV, il sistema ferroviario italiano, caratterizzato invece da un'alimentazione a tensione continua di valore pari a 3 kV e il sistema ferroviario francese, alimentato a una tensione alternata di 25 kV alla frequenza industriale (50 Hz).

Uno degli obiettivi principali per il trasporto ferroviario, come detto in precedenza, è quello di raggiungere velocità sempre più elevate aumentando il volume di passeggeri trasportati e riducendo e riducendo contestualmente i tempi di percorrenza. L'oggetto di questo progetto è quello di fornire una soluzione valida per raggiungere questi obiettivi.

Inizialmente si andrà ad introdurre i diversi sistemi di trazione elettrica esistenti con un approfondimento sul sistema di alimentazione a 3 kV in corrente che si adotta in Italia. Successivamente verranno riportati i modelli delle tratte ferroviarie utilizzati per le simulazioni statiche e dinamiche. Il capitolo 6 sarà dedicato alla nuova proposta di sistema di alimentazione 2x3 kV in corrente continua che prevede l'installazione di un convertitore elettronico di potenza in modo da ridurre le cadute di tensione in linea e aumentare la potenzialità della linea stessa.

Nei capitoli finali si è svolta la progettazione del convertitore e le relative simulazioni con confronto dei risultati ottenuti col sistema di alimentazione attuale.

2. Generalità sulla trazione elettrica

Col termine "Trazione" si vuole indicare l'insieme dei fenomeni, apparecchiature ed impianti che concorrono a provocare il movimento dei veicoli; con l'attributo "elettrica" viene specificato il tipo di energia utilizzata per la trazione stessa. L'idea di utilizzare la TE, anziché quella termica propria della macchina a vapore, risale alla fine del secolo scorso coi primi motori a corrente continua (cc) derivati dall'anello di Pacinotti (1863). Poco dopo le prime applicazioni della TE, risultò possibile la trazione termica con motori a benzina, a nafta e a gas. I motori nafta (ciclo Diesel) consentirono la costruzione di potenti locomotive, mentre gli altri motori si dimostrarono ben poco idonei, specialmente sulle lunghe tratte.

Comunque la TE venne adottata in breve tempo in tutto il mondo per i tram, per le metropolitane e per i treni, con la captazione dell'energia elettrica, tramite organi striscianti, dal filo di contatto o dalla terza rotaia. Si tentarono pure sistemi di alimentazione autonoma dei veicoli stessi, ma, in proposito, anche oggi possiamo constatare che le applicazioni pratiche sono assai deludenti.

Attualmente in tutto il mondo, all'infuori di alcune reti ferroviarie dell'Asia e dell'Africa che utilizzano ancora locomotive a vapore, la trazione è quasi esclusivamente o diesel (TD) o elettrica (TE), quest'ultima realizzata con locomotive elettriche, con automotrici elettriche o elettrotreni.

Nel nostro paese l'elettrificazione della rete ferroviaria è quasi completa e si procede tuttora alla sua estensione su linee ancora a semplice binario o su nuovi tronchi, soprattutto per motivi di unificazione. Nel contempo si debbono eseguire interventi di rinnovo degli impianti ormai in esercizio da oltre 30 anni e che richiedono nuove attrezzature con requisiti tecnologici più adeguati. I rinnovi si eseguono spesso in concomitanza con quello di altri impianti (di segnalamento, telecomunicazione, ecc.).

Circa l'indiscussa importanza della TE nella rete ferroviaria basta considerare che già attualmente il traffico ferroviario si svolge quasi completamente su linee a TE (a doppio o semplice binario).

2.1. Evoluzione dei diversi sistemi di trazione elettrica

Già dal 1860 vennero realizzate le prime macchine elettriche per trazione tranviaria con tensione intorno ai 500 V in corrente continua. Dopo il 1890 la trazione elettrica a c.c. fu applicata anche alle ferrovie metropolitane e a quelle propriamente dette, con tensioni via via crescenti (750, 1500 e 3000 V), con precedenza alle linee con sviluppo in galleria, nelle quali la trazione termica aveva gravi problemi per lo smaltimento dei fumi.

Dal motore a cc, sin da allora era apprezzata la facilità di regolazione della velocità, che si ottiene, entro certi limiti, in modo pressoché automatico come avviene nella trazione animale. Quando è richiesto un maggiore sforzo di trazione, il motore rallenta pur fornendo la stessa potenza meccanica. D'altra parte emergono anche la possibilità di regolazione tramite l'inserzione o l'esclusione di resistenza e il diverso collegamento (serie o parallelo) di più motori.

Lo schema degli impianti fissi ferroviari a 3000 V cc è il seguente:

2. GENERALITA' SULLA TRAZIONE ELETTRICA

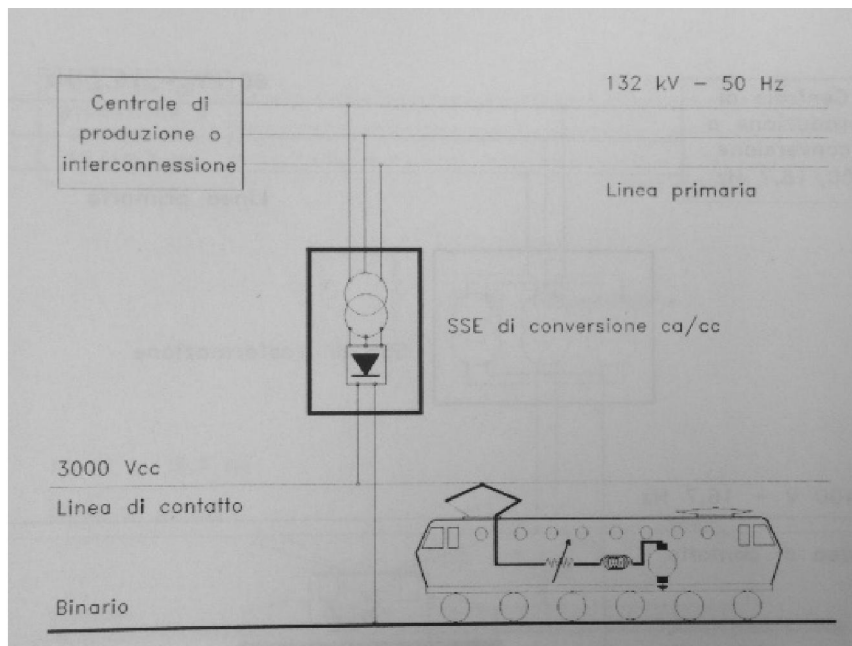


Figura 2.1 Principio di funzionamento della trazione elettrica a 3000 V in corrente continua

con linea di contatto unifilare e circuito di ritorno costituito dalle rotaie del binario. E' opportuno aggiungere che i sistemi a cc adottati nelle tramvie e nelle metropolitane concettualmente non differiscono da quello ferroviario schematizzato in figura, a prescindere dalle differenze dei parametri di funzionamento (in particolare potenze e tensioni, velocità ridotte, distanze più ravvicinate tra le SSE) e degli impianti costruttivi.

Nel 1895 nelle tranvie di Lugano si sperimentò il sistema trifase a bassa frequenza. I mezzi di trazione erano equipaggiati con motori costruiti secondo il brevetto del campo rotante di Galileo Ferraris. Erano, dunque, motori asincroni trifasi a gabbia. Il sistema si propose anche per la trazione ferroviaria con centrali di produzione e linee primarie funzionanti a 16.7 Hz, detta frequenza ferroviaria. Alla tensione di circa 3000 V, si affermò, sia pure limitatamente alle linee di valico, in Europa e negli USA. Anche in Italia la trazione con locomotive a vapore venne via via sostituita con la TE col sistema trifase a bassa frequenza, iniziando dalle linee del Nord Italia.

2. GENERALITA' SULLA TRAZIONE ELETTRICA

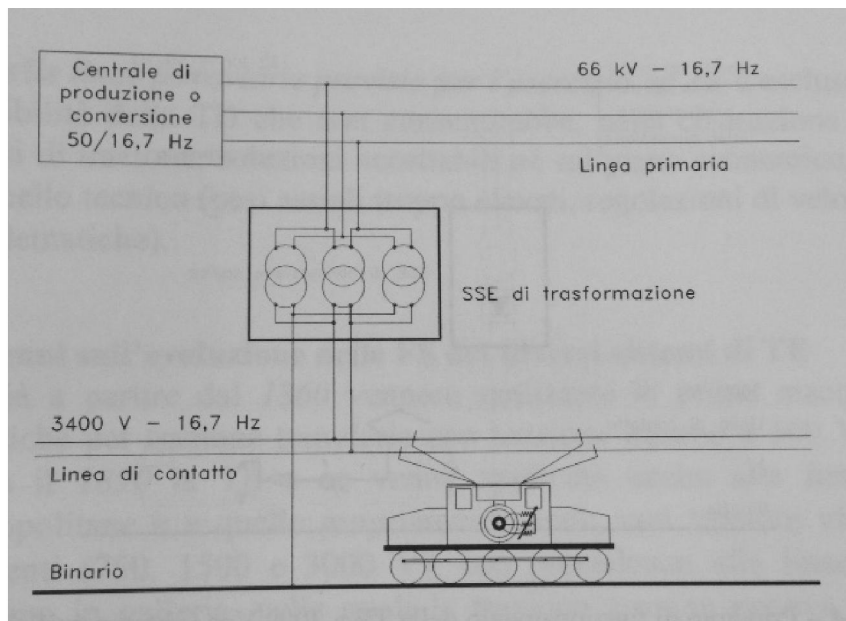


Figura 2.2 Principio di funzionamento della TE nel sistema trifase a 16,7 Hz

In figura è indicato lo schema degli impianti fissi a partire dalla centrale di produzione o di conversione ca/cc, sino a pervenire alle locomotive elettriche che funzionano con due fasi alimentate dagli archetti, che strisciano sui due fili della linea di contatto, e con la terza fase alimentata dalle rotaie, collegata a loro volta al secondario dei trasformatori di SSE collegati a triangolo.

Già nei primi anni del '900, tuttavia, il sistema trifase mostrò i suoi limiti, specie riguardo alla difficoltà nella regolazione di velocità delle locomotive (essendo la velocità vincolata al numero di giri del motore asincrono) e alla manutenzione della linea di contatto bifilare che, peraltro, rendeva problematico superare velocità di 100 km/h, a causa di inconvenienti di natura meccanica. Per questi motivi, tutti i paesi che avevano inizialmente adottato il sistema trifase lo abbandonarono pochi anni più tardi, eccezion fatta per l'Italia. Così, nei primi decenni del '900, mentre in Italia andava estendendosi la rete elettrificata in corrente alternata trifase a 3400 V, all'estero andava affermandosi il sistema a ca monofase con tensioni da 11 a 15 kV, 16.7 Hz.

2. GENERALITA' SULLA TRAZIONE ELETTRICA

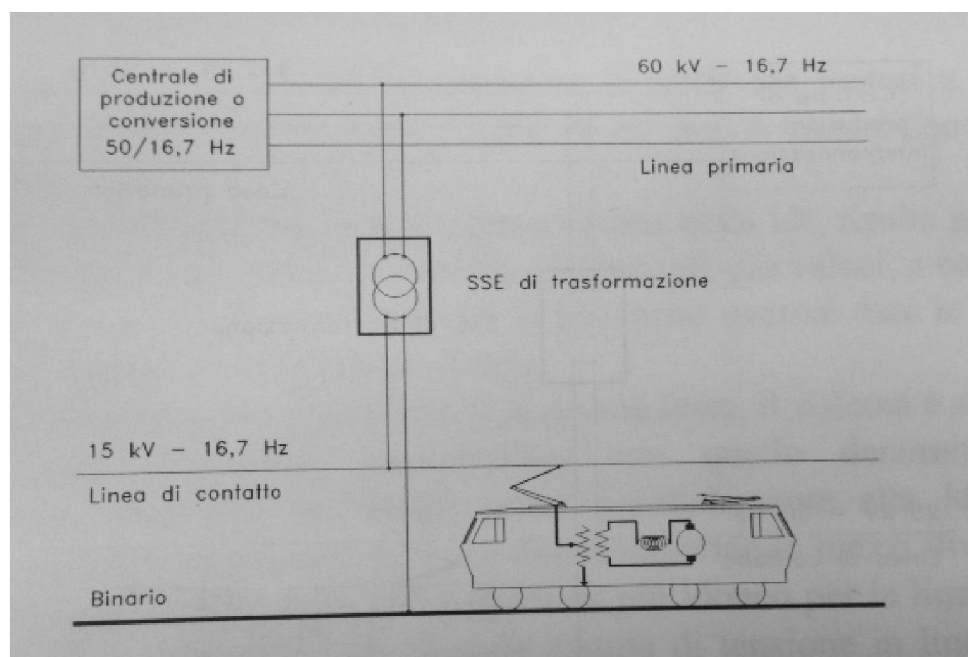


Figura 2.3 Principio di funzionamento della TE nel sistema monofase a 15 kV- 16,7 Hz

Tale sistema, oggi presente in Svizzera, Austria, Germania, Svezia, Norvegia e, alla frequenza di 25 Hz, negli Stati Uniti, ha il vantaggio di una linea di contatto unifilare e della massima semplicità di regolazione di velocità delle locomotive, mediante trasformatori di bordo a rapporto variabile.

La frequenza speciale di 16.7 Hz fu scelta per evitare le insuperabili difficoltà di commutazione dei motori monofasi a collettore che sarebbero sorte con un'alimentazione a frequenza maggiore. La necessità, per i sistemi di trazione elettrica a ca in bassa frequenza, di apposite centrali di conversione e relative primarie fu avvertita come inconveniente quando, col diffondersi degli impianti elettrici per usi industriali e domestici, venne ad imporsi la frequenza standard di 50 Hz (60 Hz in Giappone e negli USA).

Nel frattempo, il progresso tecnico nelle costruzioni elettromeccaniche e nei raddrizzatori permise la realizzazione di SSE di conversione (ca/cc) dotate di gruppi raddrizzatori esafase a vapori di mercurio anziché di gruppi convertitori rotanti. Quindi il rilancio del sistema a cc si manifestò come alternativa a quello a ca a 16,7 Hz. Passarono gli anni e iniziò l'ammodernamento delle SSE di conversione, sostituendo i convertitori a vapore di mercurio, che comportavano complicazioni di varia natura, con raddrizzatori statici.

L'avvento dei raddrizzatori statici consentì anche l'avvio del sistema monofase a 50 Hz, nel quale il raddrizzamento della corrente per l'alimentazione dei motori di trazione avviene a bordo delle locomotive. Il sistema si affermò rapidamente e attualmente è adottato in molte reti ferroviarie estere, con tensioni sulla linea di contatto di 25 kV.

2. GENERALITA' SULLA TRAZIONE ELETTRICA

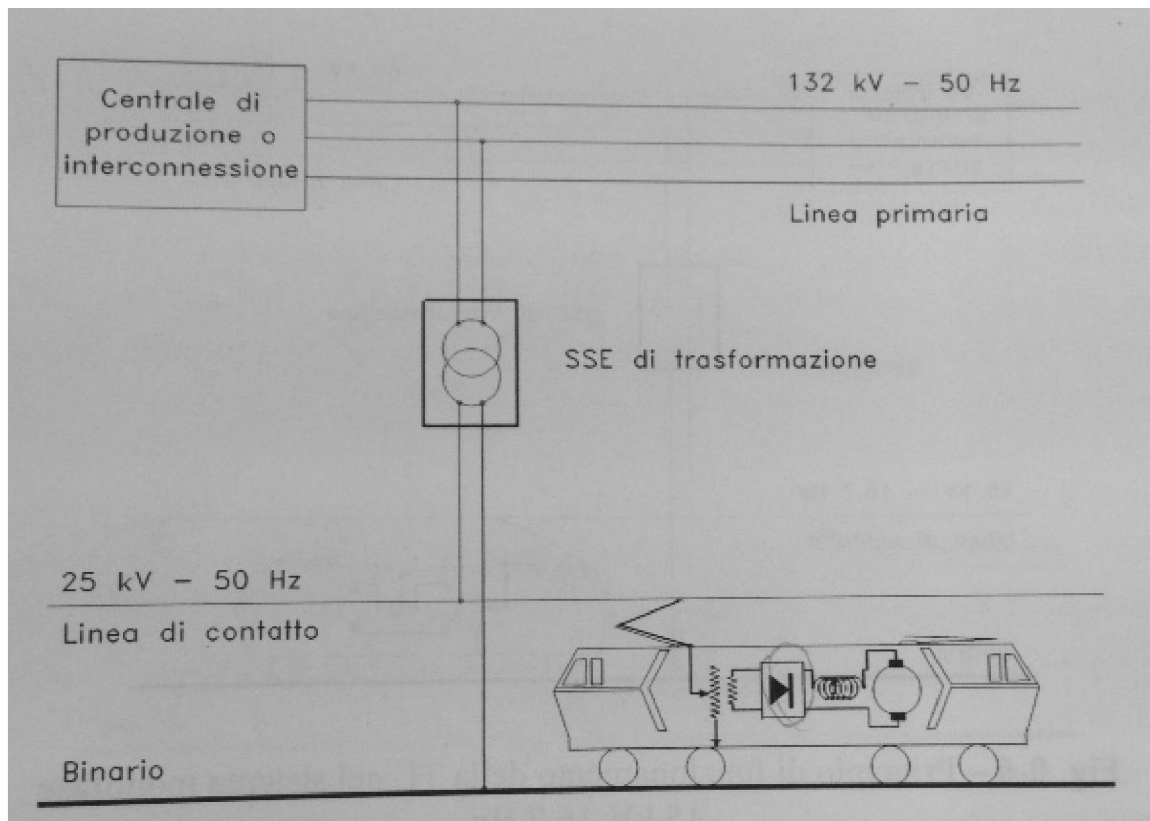


Figura 2.4 Principio di funzionamento della TE nel sistema monofase 25 kV- 50 Hz

È indicato lo schema dell'impianto. Il sistema monofase a 25 kV 50 Hz sin dall'inizio sembrò comportare più vantaggi e meno inconvenienti degli altri in quanto:

- Non sono più necessarie centrali di produzione o impianti di conversione come nei sistemi funzionanti a 16.7 Hz o a corrente continua e spesso può essere utilizzata la rete primaria ENEL a 50 Hz.
- Le SSE possono essere ubicate a distanze notevolmente superiori a quelle usuali negli altri impianti a TE.
- Gli impianti di SSE sono semplificati al massimo.
- La regolazione di velocità dei mezzi di trazione è ottenuta in modo non dissipativo con la commutazione del numero di spire di trasformatori di potenza installati a bordo. Essi, rispetto a quelli del sistema a 16.7 Hz, sono di minor ingombro e peso.
- Il sistema a 25 kV 50 Hz consente di utilizzare motori a cc simili a quelli del sistema a 3000 V cc, previa conversione a bordo ca/cc.
- Data l'eventuale tensione di alimentazione della linea di contatto, risulta possibile realizzare mezzi di trazione più potenti, più veloci, a costo competitivo e impianti fissi per le ldc meno onerosi date le sezioni ridotte del conduttore di rame.

Il sistema viene successivamente perfezionato con quello denominato 25+25 kV che, con un feeder posto in parallelo con la linea di contatto e sistemato sugli stessi sostegni, pur non comportando mezzi diversi da quelli tradizionali a 25 kV, è il risultato più idoneo per le linee ad Alta Velocità in quanto consente di avere cadute di tensione più basse in linea e, praticamente, insensibile ai disturbi elettromagnetici dovuti ai fenomeni di induzione e alle correnti disperse.

Concludendo, nel prossimo futuro è da attendersi un notevole sviluppo nelle elettrificazioni col sistema a ca monofase 25+25 kV, a 50 Hz.

2. GENERALITA' SULLA TRAZIONE ELETTRICA

2.1.1. L'alta velocità

In campo ferroviario si intendono "alte" le velocità massime di esercizio maggiori di 200 km/h, fino a 300 km/h e oltre.

Un sistema Alta Velocità (AV) richiede innanzi tutto un idoneo andamento planimetrico delle linee: secondo le specifiche italiane, che assumono: $v_M = 300 \text{ km/h}$, il raggio minimo delle curve è di 5450 m. Le caratteristiche infrastrutturali e impiantistiche non differiscono, in linea di principio, da quelle delle linee "normali", salvo gli indispensabili adeguamenti alle più elevate sollecitazioni di natura dinamica e prestazionale: l'AV, infatti, mette in gioco potenze sensibilmente maggiori, nonostante si studi la forma dei convogli in modo da ridurre, compatibilmente con le loro funzionalità, la resistenza aerodinamica al moto. A causa della notevole massa dei singoli convogli, chiamati a svolgere un servizio di trasporto "pesante"¹, gli assorbimenti a 300 km/h raggiungono, tenuto conto dei servizi ausiliari di bordo, i 10÷20 MW/treno.

Poiché si hanno nei periodi di punta forti intensità di circolazione (i treni si possono seguire a intervalli di 5 minuti), ugualmente eccezionale è l'impegno di potenza delle linee: si arriva al limite a 1.5/2 MW assorbiti/km.

E' evidente come l'AV sia resa possibile esclusivamente dalla trazione elettrica, l'unica che garantisca con larghezza i necessari livelli di potenza. Essa presenta il delicato problema della captazione di corrente dalla linea di contatto, che diventa via via più critica all'aumentare della velocità. La captazione è favorita dalla riduzione delle correnti assorbite, il che impone la scelta di sistemi di alimentazione ad alta tensione cioè a corrente alternata monofase a 15 kV-16 $\frac{2}{3}$ Hz oppure a 25 kV-50/60 Hz.

I paesi che impiegano il sistema monofase a 15 kV con frequenza ferroviaria lo ritengono adeguato per l'alimentazione delle loro linee AV e beneficiano così del grande vantaggio del sistema unico di elettrificazione, che facilita le interconnessioni e, in generale, l'esercizio: non si deve ricorrere all'impiego di mezzi di trazione policorrente.

Il sistema monofase a 25 kV-50 Hz risponde pienamente alle esigenze dell'AV e ad esso debbono ricorrere tutti i paesi le cui reti siano elettrificate a corrente continua a 1.5 kV (Francia, Olanda) o a 3 kV (Italia, Spagna), con l'inevitabile complicazione del doppio sistema.

2.1.2 Il sistema 2x25 kV

L'incremento delle potenze assorbite ha portato, in Giappone e in Francia, alla variante 2x25, dove la tensione di alimentazione fra catenaria e binario rimane sempre a 25 kV, mentre la trasmissione dell'energia avviene a 50 kV attraverso una linea primaria costituita dalla catenaria e da un alimentatore, sostenuti entrambi dalla medesima palificazione. La primaria è alimentata dal secondario a 2x25 kV dei trasformatori delle sottostazioni, la cui presa centrale è collegata al binario; lungo la linea sono distribuiti autotrasformatori a 2x25 kV, inseriti come i trasformatori di sottostazione.

2.1.3 I sistemi AV

La configurazione dei sistemi AV è varia: in Giappone la rete Shinkansen è a scartamento normale di 1435 mm e, quindi, completamente separata dalla rete normale, che ha lo scartamento di 1067 mm. Il primo tronco Tokio-Osaka è stato aperto il primo Novembre del 1964, con velocità di esercizio di 210 km/h.

¹ Un tempo i servizi più veloci erano di sola prima classe e avevano una capacità di trasporto limitata. Attualmente gli elettrotreni AV offrono 600-1000 posti di prima e seconda classe (in Giappone fino a 1800). Gli elettrotreni italiani ETR 500 composti da due locomotive e 11 carrozze hanno: $v_M = 300 \frac{\text{km}}{\text{h}}$; 600 posti; massa 630 t; potenza continuativa a 8.8 MW.

2. GENERALITA' SULLA TRAZIONE ELETTRICA

In Europa, invece, le linee AV sono collegate di solito alla rete esistente, ad eccezione della Spagna, dove la AVE²Madrid - Siviglia, inaugurata nel 1992, è forzatamente separata a causa del diverso scartamento. Questa linea è a 25 kV-50 Hz, salvo i tratti terminali, contigui a linee elettrificate a 3 kV cc, dove è mantenuta questa tensione: gli elettrotreni e le locomotive sono pertanto ad alimentazione bicomponente.

In Francia il sistema TGV (Train a Grande Vitesse) a 25 kV-50 Hz è riservato agli elettrotreni AV, che però frequentano anche le linee esistenti francesi, elettrificate a 1.5 kV in cc oppure a 25 kV-50 Hz, o straniere, o verso la Svizzera, la Gran Bretagna, l'Italia, la Germania. I TGV sono quindi ad alimentazione almeno a bicomponente, se non a tricomponente o addirittura a quadricomponente.

Il primo tratto della Parigi - Lione (TGV Sud - Est) è stato inaugurato nel 1981; l'intera linea, i cui tratti terminali sono a 1.5 kV in cc è stata completata nel 1983 e ha la velocità di 270 km/h. Negli anni 1989/1990 è stato aperto all'esercizio il TGV Atlantique, verso Tours, con velocità massima di 300km/h; hanno fatto seguito gli altri collegamenti, tra i quali il più significativo con Londra attraverso la galleria sotto la Manica, che funziona attualmente in Gran Bretagna a 750 V c.c. a terza rotaia, a velocità e potenza ridotte.

In Italia l'esercizio Alta Velocità a 250 km/h è iniziato nel 1977 nella prima sezione (Settebagni - Città del Piave) della "Direttissima" Roma - Firenze, completata nel 1992 ed elettrificata, come il resto della rete, a 3 kV c.c.

² Questa sigla ha un doppio significato: << Alta Velocidad Espanola>> e <<Ancho de Via Europeo>>, cioè scartamento normale di 1435 mm; lo scartamento spagnolo è, invece, di 1668 mm.

3. Il sistema 3 kV a corrente continua in Italia

3.1. Introduzione

In Italia il problema dell'elettrificazione ferroviaria era divenuto pressante, oltre che per motivi tecnici, per ragioni economiche. Il Paese era pesantemente tributario dell'estero per il carbon fossile, per un quinto destinato alle ferrovie; la prima guerra mondiale ne aveva enormemente accresciuto il prezzo, con gravi conseguenze sulla debole economia del Paese, che a ragione vedeva nell'energia idroelettrica un mezzo per alleggerire la propria bilancia dei pagamenti. L'elettrificazione in corrente continua trovò tuttavia ostacoli, oltre che a causa della guerra e del turbolento periodo che ne era seguito, per le polemiche sulla scelta del "sistema".

Le brillanti esperienze americane inducevano a ritenere la corrente continua a 3000 V sotto tutti gli aspetti la più vantaggiosa, ma vi erano molti fautori dell'esistente sistema trifase "italiano", tra i quali la direzione delle FS. Il consiglio superiore delle acque, che per legge era allora competente in questo campo, nel 1921 propose al Governo di continuare a elettrificare in trifase la rete nelle regioni del nord e di sperimentare sia la corrente continua a 3000 V sulla Benevento - Foggia, sia la corrente alternata trifase a frequenza industriale sulla Roma - Sulmona.

L'elettrificazione trifase a 10 kV - 45 Hz fu compiuta nel 1928/1929 da Roma Prenestina ad Avezzano e successivamente fino a Sulmona. L'esperimento non ebbe seguito: per le nuove locomotive, con trasmissione a bielle come quelle a 16 2/3 Hz, la frequenza industriale e l'alta tensione di linea comportavano complicazioni, anziché vantaggi, in quanto richiedevano in più un trasformatore e riduttori a ingranaggi fra i motori e il biellismo. Gli scambi aerei, data la tensione di 10 kV tra i fili, erano inoltre estremamente critici. Già nel 1935 il tratto Roma - Mandela venne trasformato a corrente continua, dopo la seconda guerra mondiale l'intera linea è stata elettrificata a 3000 V.

Sulla Benevento - Foggia l'esercizio a 3000 V iniziò nel 1928 e dimostrò subito la netta superiorità della corrente continua ad alta tensione rispetto al trifase; i suoi punti di forza erano:

- La linea di contatto unipolare
- La notevole distanza fra le sottostazioni¹, alimentate dalla rete trifase industriale
- La grande elasticità di funzionamento dei mezzi di trazione.

Le sottostazioni erano allora equipaggiate con gruppi rotanti, ma già in quelle di Apice fu installato un raddrizzatore a vapore di mercurio: era l'inizio di un'evoluzione verso la conversione statica, che si sarebbe in breve diffusa semplificando enormemente le sottostazioni.

Il successo del sistema, subito esteso alla Benevento - Napoli (1931), confermò la scelta della corrente continua a 3000 V per tutte le nuove elettrificazioni, che negli anni 1933-1939 compresero la direttissima Bologna - Firenze e Roma - Napoli e le linee Firenze - Roma, Udine - Tarvisio, Porrettana, Napoli - Reggio Calabria, Milano - Bologna - Ancona, Roma - Livorno, Chiasso - Milano - Voghera e Orte - Falconara. Il servizio compì un notevole salto di qualità e trovò la sua espressione più significativa negli elettrotreni serie ETR 200, che raggiungevano la velocità massima di 160 km/h e superarono, in corso di prove, i 200 km/h.

3.2 Struttura generale

Il sistema ferroviario italiano è composto da una rete di alimentazione, sottostazioni di conversione e circuiti per l'alimentazione dei mezzi di trasporto. Le componenti principali sono:

- Le linee primarie (LP)
- Le sottostazioni elettriche di conversione (SSE)
- La linea di contatto (ldc)
- Il circuito di ritorno (cdr)

¹ Si arrivò a 40 - 50 km

3. IL SISTEMA A 3 KV A CORRENTE CONTINUA IN ITALIA

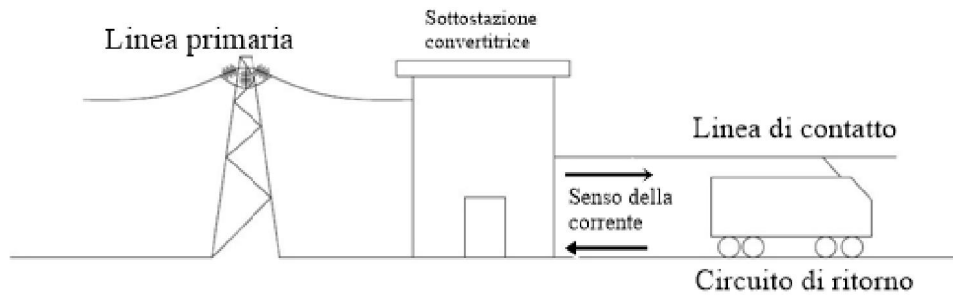


Figura 3.1 Struttura del sistema elettrico ferroviario italiano

Le centrali di produzione sono in genere costruite e gestite da ENEL e hanno lo scopo di fornire energia ad alta tensione (132 o 150 kV) al fine di rendere conveniente il trasporto a grande distanza. Le linee primarie ricevono energia anziché direttamente dalle centrali di produzione da "stazioni di interconnessione con le linee primarie dell'ENEL. Questi impianti alimentano le SSE che sono disposte in modo opportuno lungo le tratte di linee ferroviarie da servire. Esse hanno lo scopo di alimentare le linee di contatto, dalle quali i convogli captano la corrente che rientra in SSE dal circuito di ritorno (binario).

Ora si descrivono le varie parti dell'impianto.

3.2.1. Le linee primarie

Per linee primarie (LP) si intendono le linee elettriche a tensione superiore a 1000 V a corrente alternata (ca) a frequenza industriale (50 Hz). Le Ferrovie dello Stato (FS) le classifica secondo tre diversi livelli in base al valore della tensione nominale della linea:

Tabella 3.1 Classificazione delle linee primarie in base al livello di tensione secondo FS

Classificazione delle linee primarie FS		
Livello	Tensione nominale in kV	Campo di impiego
1°	$1\text{ Kv} < V < 30\text{ kV}$	Linee a media tensione (MT)
2°	$30\text{ kv} < V < 120\text{ kV}$	Linee ad alta tensione (AT)
3°	$120\text{ kV} < V < 220\text{ kV}$	

Le linee primarie di primo livello prendono energia dalle SSE e alimentano posti di trasformazione su palo, oppure cabine elettriche, per poter fornire energia, in bassa tensione, agli impianti ausiliari (illuminazione, officine, ecc.).

Le linee primarie di 2° e 3° livello collegano le centrali di produzione e le stazioni di alimentazione (di ENEL) alle sottostazioni elettriche FS e altre utenze anche non FS.

Per approfondimenti più dettagliati sulle linee primarie si rimanda a [1] e [3].

3. IL SISTEMA A 3 KV A CORRENTE CONTINUA IN ITALIA

3.2.2 *Le sottostazioni elettriche*

Le Sottostazioni Elettriche (SSE) sono impianti che ricevono energia da una o più linee primarie (LP) e ne modificano i parametri elettrici per poter alimentare le linee di contatto (ldc) e quindi i mezzi di trazione.

Ogni SSE è realizzata in tre grandi reparti:

- Reparto AT (a ca all'aperto)
- Reparto a 3 kV cc (al chiuso)
- Reparto a 3 kV cc (all'aperto)

Questi impianti hanno subito nel corso degli anni molti cambiamenti, dovuti sia a un'evoluzione tecnologica sempre più spinta, sia a requisiti sempre più spinti in termini di sicurezza e affidabilità di esercizio.

Le SSE di conversione un tempo erano alimentate a 66 kV mentre ora si è passati ad una alimentazione a 132 o 150 kV. Tutta l'installazione in passato, sia alla tensione ca della LP che a 3000 V cc, era sistemata all'interno di un apposito edificio, normalmente a due piani. La SSE era denominata al chiuso. Oggi le SSE sono costruite col reparto ad alta tensione all'aperto e solo quello a 3000 V e i servizi ausiliari al chiuso; cioè sono di tipo misto, con vantaggi sia economici, sia di sicurezza per il personale. Inoltre, un sempre più largo utilizzo di sistemi di telecontrollo, rende non più necessaria la presenza del personale all'interno delle SSE, che risultano quindi impresenziate. I trasformatori, in caso di guasti, attualmente non vengono più ispezionati e riparati sul posto. Questo fa sì che non sia più necessaria la presenza della sala gru. Ogni SSE ha generalmente più gruppi di conversione che adottano raddrizzatori formati da diodi al silicio anziché i mutatori funzionanti a vapori di mercurio. Sempre nelle SSE sono state migliorate le condizioni di sicurezza per il personale mediante una diversa disposizione delle apparecchiature e l'adozione di blocchi elettrici e di segnalazioni all'ingresso dei locali, cioè dove vi possono essere situazioni di possibile pericolo. Infine, da alcuni anni si è estesa l'adozione di impianti di telecomando nei quali un Dirigente Operativo TE (DOTE), può tenere sotto controllo e gestione, da un unico posto centrale, non solo le SSE e le cabine TE ma anche le LP e le ldc in ambiti di rete sempre più vasti.

Potenza e distanziamento delle SSE di conversione

Su una linea ferroviaria, la potenza complessivamente necessaria per la circolazione dei treni dipende ovviamente dal numero e dalla tipologia dei treni stessi, oltre che dalla caratteristica del tracciato. Per una linea ferroviaria a medio traffico la potenza necessaria per la marcia dei treni è circa 50 kW per km di linea elettrificata; quella installata deve essere il doppio per sopperire ai sovraccarichi prevedibili e per costituire una certa riserva. L'aumento del traffico e della velocità dei treni ha provocato un notevole aumento dei consumi di energia. Le SSE attuali, con tre gruppi da 5.4 kW, erogano energia quantificabile in circa 100000 kWh al giorno.

3. IL SISTEMA A 3 KV A CORRENTE CONTINUA IN ITALIA

Tabella 3.2 Potenza assorbita a definite velocità da parte dei principali convogli circolanti sulla rete

Massa, velocità e potenza di alcuni mezzi di trazione				
	Mezzi di trazione	Massa [t]	Velocità [km/h]	Potenza cc assorbita [MW]
Elettrotreno AV	ETR.500	/	300	
Pendolino	ETR.450	500	250	
Viaggiatori intercity	E.444	700	180	
Viaggiatori espresso	E.656	900	150	
Merci TC	E.633	900	120	
Merci TC	E.645	1200	100	

Tenuto conto di quanto detto sopra, a causa dell'aumentare del traffico e delle caratteristiche dei treni sempre più spinte, le FS hanno dovuto adeguare potenza e distanziamento delle SSE, aumentando di pari passo la sezione della linea di contatto per limitare la caduta di tensione in linea.

Tabella 3.3 Evoluzione delle caratteristiche degli standard adottati per le SSE da parte di FS

Potenza e distanziamento delle SSE				
Distanziamento delle SSE consecutive	Gruppi di conversione		Velocità massime dei treni	Sezione del rame nella catenaria
	N.	tipo		
40 km	2	A vapori di mercurio 2000 kW	150	2x100 + 120 = 320mm ²
20 km	2 o 3	Con diodi al silicio, 3600 kW	160	2x100 + 2x120 = 440mm ²
12 km DD Firenze - Roma	3 o 4	Con diodi al silicio, 5,4 kW e regolazione automatica della tensione	250	2x150 + 2x155 =610 mm ²

Collegamento delle SSE alle linee primarie

Le linee primarie possono alimentare le SSE in vario modo, con una o più terne. Il caso più semplice è quello di una singola terna che si attesta, nell'ambito della SSE, ad uno o più sbarre AT, dalle quali si derivano i gruppi convertitori (trasformatore - raddrizzatore). La tensione raddrizzata, filtrata, ecc., arriva alle celle di alimentazioni delle diverse sezioni della linea di contatto.

Gli schemi dei collegamenti sono numerosi e nel corso degli anni hanno subito una graduale evoluzione, diventando sempre più complessi e consentono una flessibilità maggiore per l'impianto. Una prima grande differenza è data dal tipo di collegamento che può essere in serie o in derivazione.

3. IL SISTEMA A 3 KV A CORRENTE CONTINUA IN ITALIA

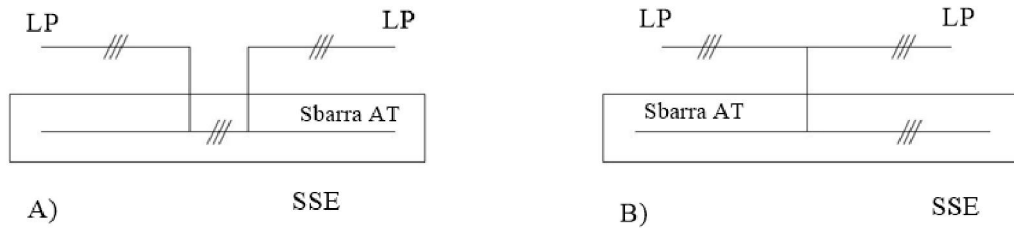


Figura 3.2 Schema di collegamento delle SSE

La configurazione serie consente di collegare la LP in entrata con quella in uscita, in questo modo la SSE può essere alimentata da una delle due linee primarie oppure da entrambe. Questo tipo di sistema garantisce la continuità del servizio anche in caso di fuori servizio della LP di un lato.

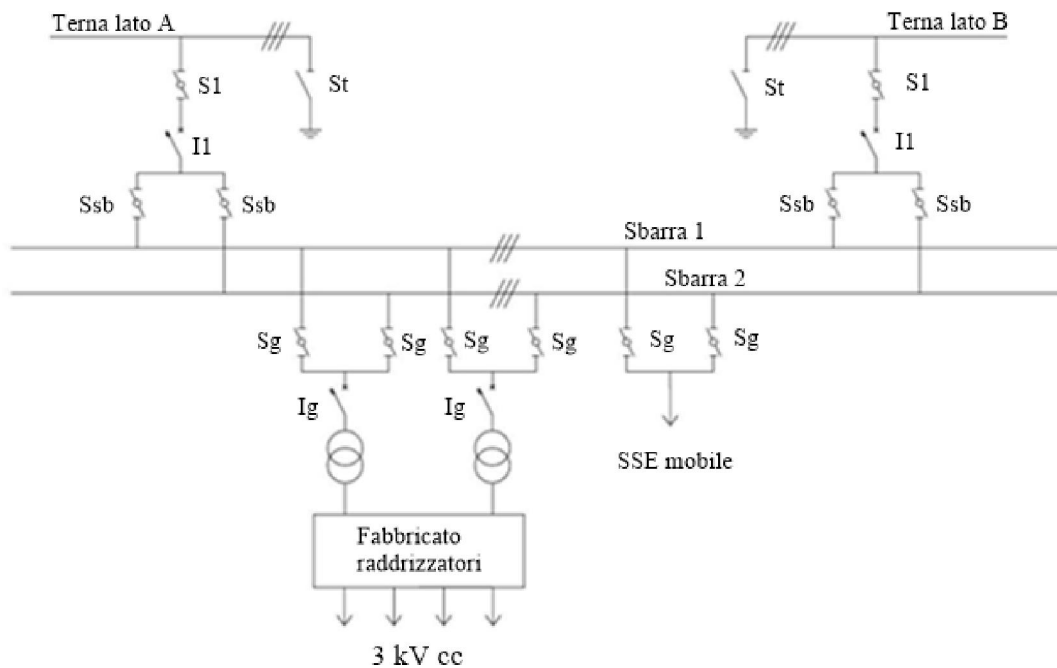


Figura 3.3 Schema di collegamento di una SSE in serie con doppia sbarra

La SSE in figura presenta una doppia sbarra in AT e due gruppi convertitori, inoltre sono riportati anche sezionatori e interruttori automatici. I sezionatori sono:

- S_T - di terna e in entrata e uscita
- S_{sb} - di collegamento alla sbarra 1 e alla sbarra 2
- S_d - di derivazione dei gruppi dalla sbarra 1 o 2
- S_t - di sicurezza con lama di terra

Gli interruttori I e I_G sono quelli di terna primaria e dei gruppi convertitori e sono posizionati all'esterno nel reparto AT. Gli interruttori extrarapidi afferenti alle diverse zone elettriche della dc vengono invece installati al chiuso nel reparto a 3 kV nel fabbricato con i raddrizzatori.

Un altro esempio di collegamento in serie può essere il seguente:

3. IL SISTEMA A 3 KV A CORRENTE CONTINUA IN ITALIA

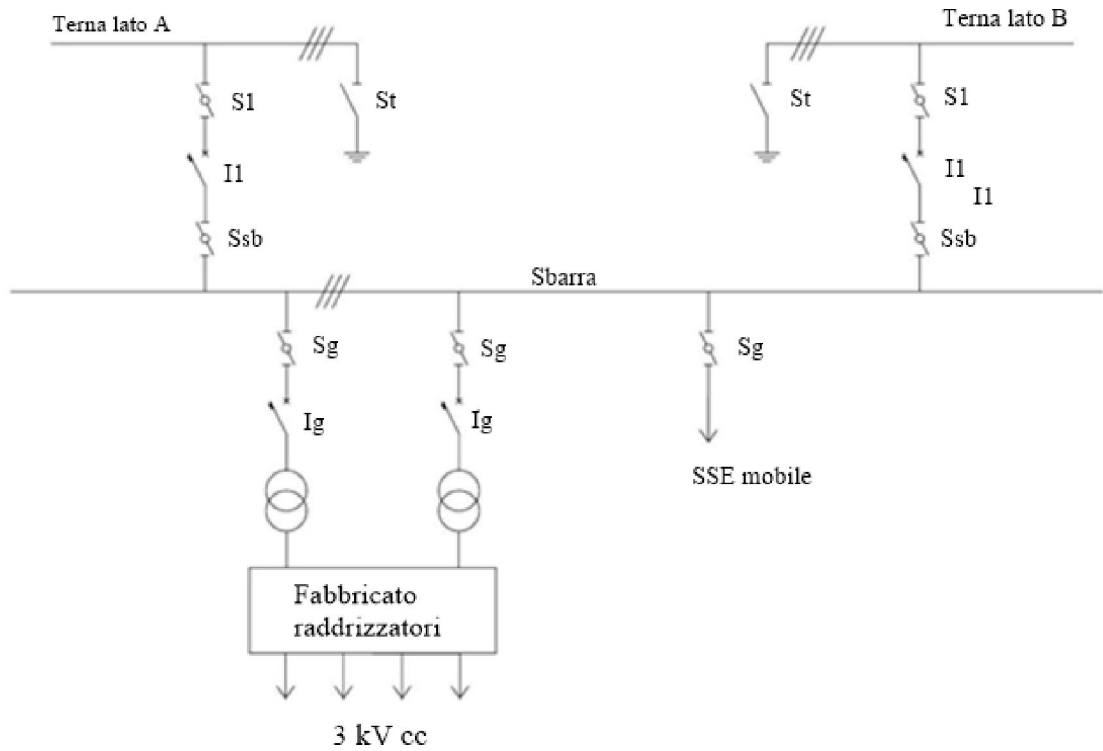


Figura 3.4 Schema di collegamento di una SSE in serie con singola sbarra

In questo caso si avrà una solo sbarra AT e ne deriva una minore elasticità d'esercizio, in quanto la doppia sbarra ne consente anche di alimentare un gruppo con la terna lato A e un gruppo con la terna lato B.

Uno schema generale per il collegamento in derivazione è il seguente:

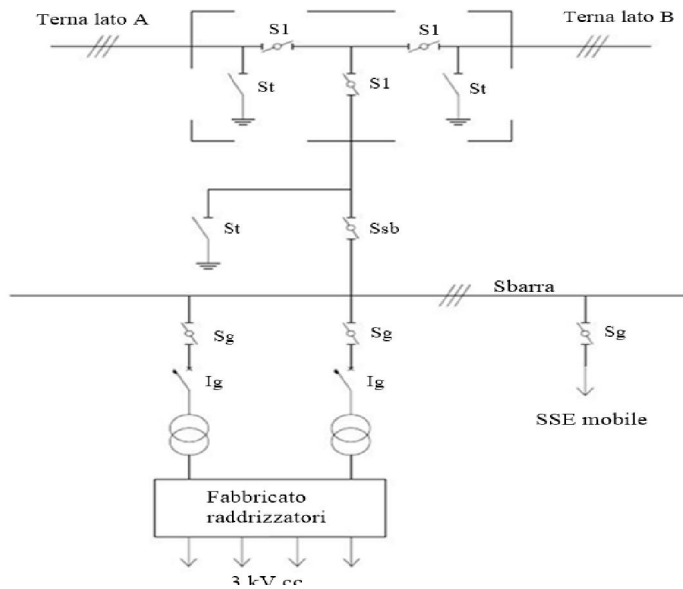


Figura 3.5 Schema di collegamento di una SSE in derivazione

3. IL SISTEMA A 3 KV A CORRENTE CONTINUA IN ITALIA

In questo avremo un sezionamento nella linea primaria, dalla quale parte un'antenna che alimenta la SSE. Per il resto lo schema non differisce da quello precedente. In tutti gli schemi sopra citati è previsti anche un'alimentazione per una eventuale SSE mobile. Esistono molte altre configurazioni ma non si vuole entrare nel merito troppo in dettaglio.

Il reparto in alta tensione

Il reparto AT è il primo che si incontra provenendo dalle LP. Il confine di entrata del reparto è dato dalle strutture di amarro alle quali si assestano le linee primarie che alimentano le SSE, mentre il confine di uscita è rappresentato dai passamuro, posti su un fronte del fabbricato del Reparto a 3 kV cc.

Le principali apparecchiature del reparto AT sono:

- Trasformatori di misura e scaricatori AT
- Sezionatori
- Interruttori
- Trasformatori (di potenza e dei servizi ausiliari)

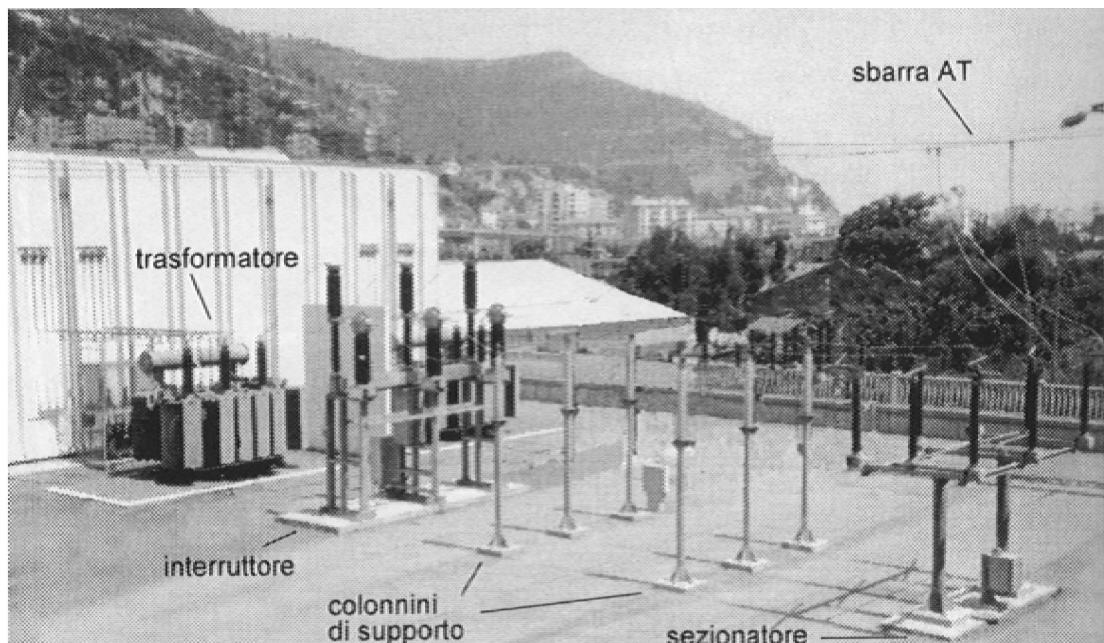


Figura 3.6 Reparto Alta Tensione della SSE di Ventimiglia

Il lay-out delle apparecchiature e di tutte le altre opere può variare, non solo per il numero di linee primarie e di gruppi, ma anche per l'orografia del sito dove è ubicata la SSE, la posizione degli accessi stradali e ferroviari, l'ubicazione dei fabbricati e del binario della sottostazione mobile. In ogni caso devono essere rispettate le distanze di sicurezza dai vari componenti.

Le recinzioni sono molto importanti perché segnano il confine e l'ambito delle installazioni di SSE, e impediscono l'accesso ad estranei che potrebbero accidentalmente subire gravi infortuni. Esse sono realizzate in muratura o con pannellatura in cemento armato, limitando l'impiego di materiali metallici ai cancelli e ai varchi di accesso pedonali, stradali e ferroviari.

3. IL SISTEMA A 3 KV A CORRENTE CONTINUA IN ITALIA

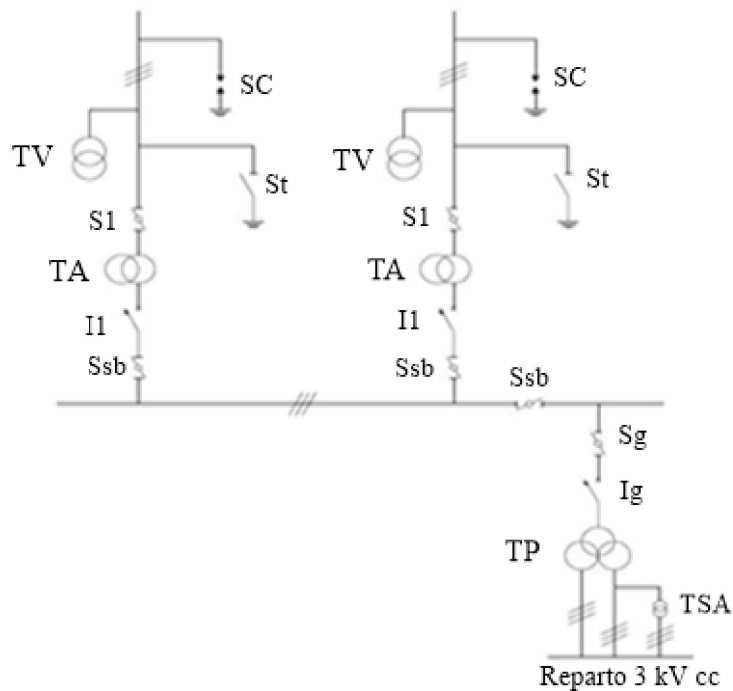


Figura 3.7 Schema unifilare del reparto Alta Tensione della SSE di Ventimiglia

Legenda:

- SC = Scaricatore
- TV = Trasformatore di misura di tensione
- TA = Trasformatore di misura di corrente
- TP = Trasformatore di potenza
- TSA = Trasformatore dei servizi ausiliari
- St = Sezionatore con lame di terra
- S1= Sezionatore di linea
- I1 = Interruttore di linea
- Ssb= Sezionatore di sbarra
- Sg= Sezionatore di gruppo
- Ig = Interruttore di gruppo

Il reparto AT può essere suddiviso in due parti: la prima compresa fra la linea primaria e la sbarra AT, la seconda fra la sbarra AT e gli isolatori passamuro di ingresso nel fabbricato del reparto a 3 kV cc. Ora si andrà a descrivere brevemente le diverse apparecchiature presenti nel reparto AT.

➤ *Trasformatori di misura*

Sono le prime apparecchiature che si incontrano in un qualsiasi reparto AT di una SSE. Essi si suddividono in TV e TA (voltmetrici e amperometrici), solitamente il TV è posto a monte del primo sezionatore, mentre il TA è posto a valle del medesimo sezionatore. Essi vanno montati su cavalletti metallici di altezza sufficiente ad evitare pericoli per tensioni di contatto e hanno il compito di rilevare le grandezze in ingresso alla SSE. Tali trasformatori hanno avvolgimenti isolati e raffreddati in olio, all'interno di un isolatore cilindrico tipo antisale.

3. IL SISTEMA A 3 KV A CORRENTE CONTINUA IN ITALIA

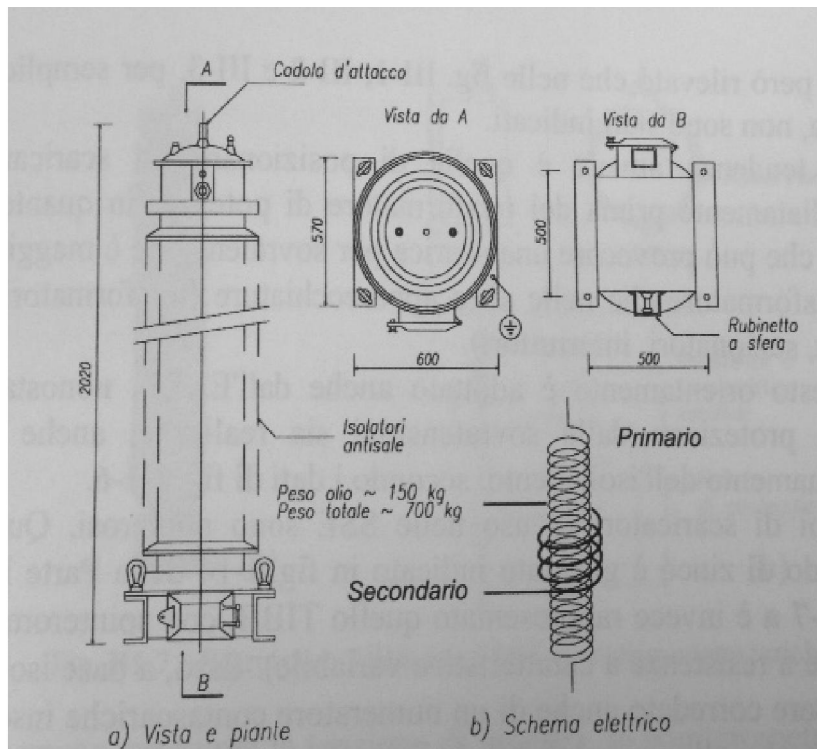


Figura 3.8 Trasformatore di tensione TV tipo C65 per 150 kV

➤ Scaricatori AT

Gli scaricatori hanno il compito di proteggere la SSE dalle sovratensioni provenienti dalle linee primarie in modo da non danneggiare le diverse apparecchiature. L'ubicazione degli scaricatori può essere rilevante agli effetti delle apparecchiature da proteggere. La tendenza attuale è quella di posizionare gli scaricatori immediatamente prima del trasformatore di potenza. I tipi di scaricatori in uso nelle SSE sono numerosi, ad esempio si possono utilizzare quelli all'ossido di zinco oppure quello TIBB con spinterometro.



Figura 3.9 Vista di uno scaricatore tipo TIBB

➤ *Sezionatori AT*

I sezionatori impiegati nei reparti all'aperto sono apparecchiature ad AT a corrente alternata che permettono di isolare in aria determinate sezioni del circuito AT (linea primaria, interruttori, sbarre, trasformatori) per potervi accedere senza pericolo. Le norme antinfortunistiche prevedono che, nel caso in cui si debbano eseguire lavori fuori tensione, il sezionamento del circuito sia ben visibile. In questo senso il sezionatore deve dare una indicazione visiva evidente (di apertura o chiusura) e non deve prevedere il comando da dispositivi automatici, per evitare chiusure intempestive. Essi, anche se sotto tensione, debbono essere manovrati solo a circuito aperto rispetto a quanto accade per gli interruttori che possono essere manovrati sotto carico. Nei reparti all'aperto delle SSE di tipo misto attualmente i sezionatori sono di solito con poli a tre colonnine di isolatori alettati per ogni fase. La colonna centrale, girevole sul suo asse, è solidale alla lama che porta i contatti mobili; i contatti fissi sono posti alla sommità delle colonnine laterali. Questo tipo di sezionatore è detto trifase rotativo

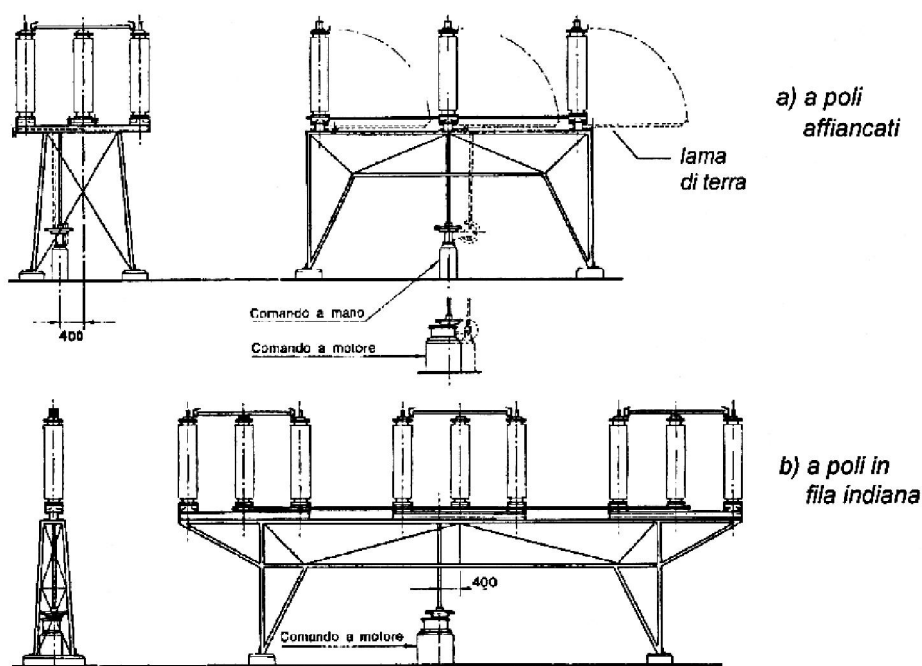


Figura 3.10 Sezionatori tripolari di tipo rotativo: a) a poli affiancati b) a poli in fila indiana

I sezionatori trifase rotativi possono avere due distinti montaggi dei poli. Se, a sezionatore chiuso, le tre lame risultano parallele, allora il sezionatore è a lame affiancate, mentre se le tre lame risultano su di un unico allineamento, si dice che il sezionatore ha i poli in fila indiana. La scelta di quale utilizzare dipende dallo spazio disponibile nel piazzale e dalle semplificazioni dei collegamenti che si intendono ottenere con sbarre, interruttori, ecc. Il sezionatore oltre alle tre normali lame di sezionamento è dotato di altre tre lame di terra che, muovendosi in modo simultaneo con il moto di rotazione intorno alla base della corrispondente colonnina del sezionatore, cortocircuitano la colonnina stessa. Questo accorgimento è necessario affinché in quanto, nel caso si debbano eseguire dei lavori in linea, le norme prescrivono la messa a terra della stessa per la sicurezza del personale. La manovra dei due gruppi è interbloccata meccanicamente, in modo che il collegamento a terra sia possibile solo se le lame principali sono in posizione aperto.

In alcune SSE, dove i collegamenti AT sono in tubo rigido, vengono impiegati sezionatori a pantografo che richiedono spazi ridotti.

3. IL SISTEMA A 3 KV A CORRENTE CONTINUA IN ITALIA

➤ Interruttori AT

Gli interruttori sono apparecchi in grado di interrompere o dare continuità in un circuito elettrico anche quando ha un carico inserito. Nelle SSE sono installati nel reparto all'aperto.

Essi sono costituiti da tre poli dove, all'interno di ogni polo, i contatti di interruzione sono immersi in un fluido isolante in grado di eliminare l'arco elettrico che si origina al momento dell'apertura dell'interruttore.

Per l'immediata interruzione degli archi si deve ottenere l'allontanamento delle particelle ionizzate (senza ritardo) che si creano in conseguenza degli archi stessi. Tale problema è persistito per molti anni ed è stato risolto utilizzando, come fluido di spegnimento, olio minerale opportunamente deumidificato, filtrato e trattato.

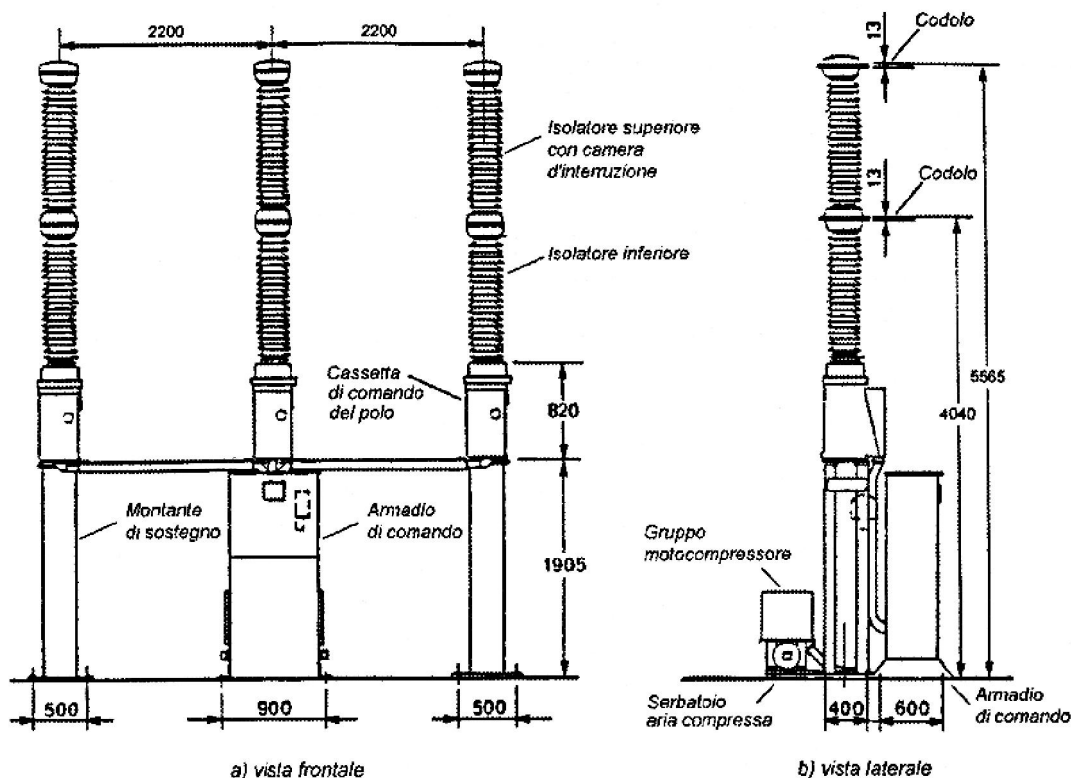


Figura 3.11 Vista frontale a) e laterale b) di un interruttore utilizzato nel reparto AT

Ciascun polo è montato su un cavalletto metallico, di una certa altezza, per distanziare da terra le parti tensionabili, comprende due isolatori cilindrici alettati, sovrapposti e cavi all'interno per contenere, oltre ai contatti, anche un volume relativamente esiguo di olio. Nell'isolatore superiore è installato il dispositivo d'interruzione mentre in quello inferiore un dispositivo di rilevazione della corrente e della tensione e il meccanismo per lo spostamento dei contatti mobili

In passato, sono stati utilizzati anche interruttori ad aria compressa dove l'azione di spegnimento dell'arco veniva effettuata tramite aria compressa contenuta in un serbatoio sottostante ai poli e inviata sui contatti tramite un dispositivo comandato dall'apertura dei contatti stessi. Da alcuni si utilizza come fluido isolante l'esafluoruro di zolfo (SF_6) che è un gas con caratteristiche chimico-fisiche superiori a quelle dell'olio minerale e dell'aria. L'azionamento contemporaneo dei tre poli può essere realizzato a comando o in modo automatico qualora il dispositivo rilevi qualche anomalia.

3. IL SISTEMA A 3 KV A CORRENTE CONTINUA IN ITALIA

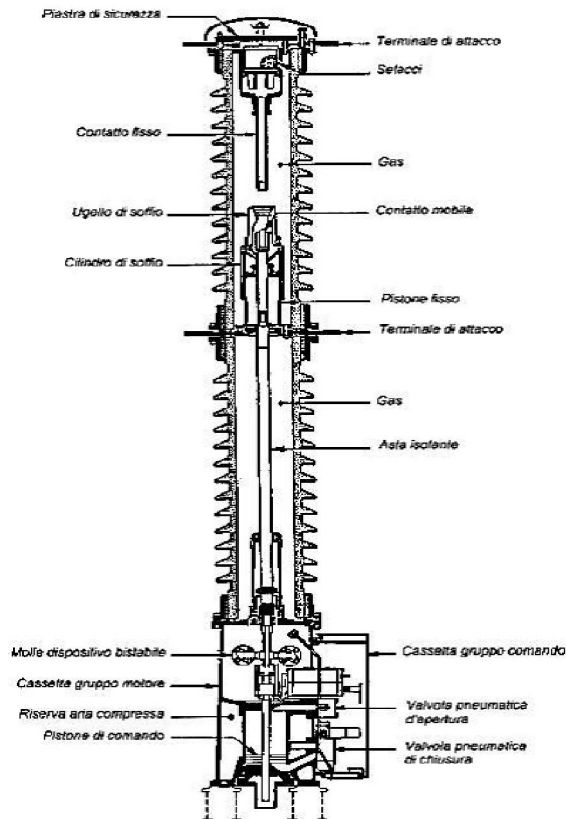


Figura 3.12 Vista in sezione di un interruttore utilizzato nel reparto AT in posizione di aperto

Di seguito sono riportate alcune specifiche tecniche riguardanti gli interruttori del reparto AT delle SSE.

Tabella 3.4 Caratteristiche tecniche degli interruttori utilizzati nel reparto

Parametri di funzionamento degli interruttori AT		
Parametri elettrici	Tensione nominale in kV Corrente nominale in A Potere di interruzione in A Sovraccarico nominale per 1 s Riduttori di corrente con rapporto $k = I_I / I_{II}$	66-132-150 600-650 7000-30000 8000-22000 800-200/5 (*) 40/5 (**)
Parametri meccanici	Tempo nominale d'apertura in s Tempo nominale di chiusura in s Durata dell'arco in s	0.08-0.12 0.30-0.23 < 0.01
(*) per interruttori di linea (**) per interruttori di gruppo		

3. IL SISTEMA A 3 KV A CORRENTE CONTINUA IN ITALIA

I trasformatori di potenza utilizzati nelle SSE sono a tre avvolgimenti con primario (avvolgimento in alta tensione collegato a stella, mentre i due secondari (a bassa tensione) sono collegati uno a stella e uno a triangolo (Yyd11).

Non è previsto il collegamento a terra del centro stella degli avvolgimenti a massa. Tale configurazione permette di ottenere sui secondari delle tensioni sfasate di 30° elettrici rendendo possibili l'utilizzo di un convertitore a dodici impulsi nella fase di raddrizzamento della tensione. Costruttivamente presenta un nucleo a tre colonne con le bobine degli avvolgimenti di bassa tensione interne rispetto quelle di alta tensione, dato che quest'ultimo è dotato di varie prese intermedie collegate al variatore sotto carico. Sono generalmente con isolamento in carta a bagno d'olio con raffreddamento naturale e dotati di numerosi dispositivi di protezione atti a rilevare eventuali anomalie di esercizio.

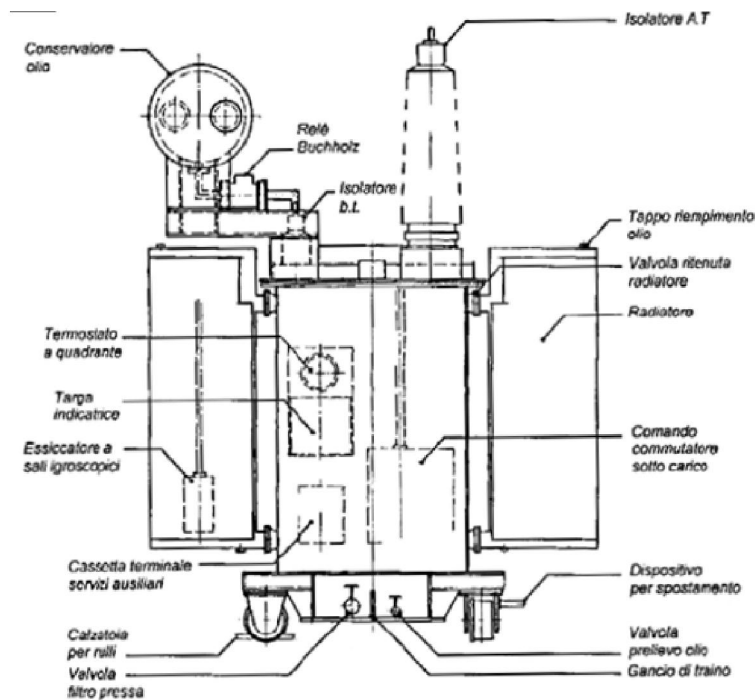


Figura 3.13 Vista laterale di un trasformatore da 5750 kVA

Uno dei dispositivi di protezione più importanti è il relè Buchholz che viene posizionato nel tubo di collegamento fra il cassone e il recipiente di espansione dell'olio. Il funzionamento di tale relè, in presenza di guasti interni, si basa sul fatto che si verifica la formazione di bollicine di gas all'interno dell'olio, dovuto alla decomposizione dello stesso a causa delle elevate temperature raggiunte, il tutto porta al movimento di un galleggiante. Si avranno due soglie di intervento a seconda dell'entità del gas sviluppato, legato a sua volta alla gravità del guasto. La prima soglia genera solo un allarme mentre, nei casi più gravi, viene comandata l'apertura automatica dell'interruttore di gruppo.

3. IL SISTEMA A 3 KV A CORRENTE CONTINUA IN ITALIA

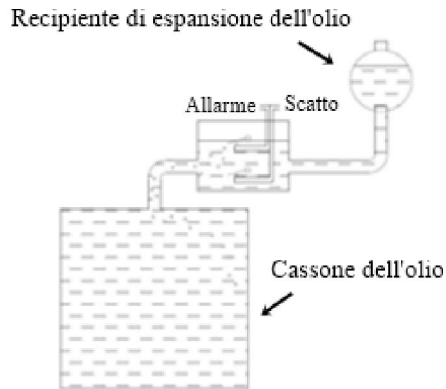


Figura 3.14 Principio di funzionamento del relè a gas (Buchholz)

Per regolare la tensione in uscita i trasformatori sono dotati di un dispositivo variatore sotto carico. Un dispositivo di questo tipo non è altro che un cursore meccanico che include o esclude un certo numero di spire per ogni tacca del variatore. Tale cursore meccanico è gestito da un regolatore che interviene con un tempo di ritardo pari a $T_1 = 30s$. Se la tensione, dopo lo spostamento di una tacca del cursore, non rientra ancora all'interno della tolleranza, dopo un tempo $T_2 = 5s$, avviene lo spostamento di un'altra tacca. Il processo termina quando la tensione rientra all'interno dei valori consentiti.

La tensione di cortocircuito dei trasformatori di potenza utilizzati nelle SSE è compresa fra il 5 e il 12% della tensione nominale. I valori appena citate sono molto superiori a quelli che si hanno nei normali trasformatori di distribuzioni. Questa scelta è data dal fatto che tali trasformatori devono sopportare elevate correnti di cortocircuito, limitandone il valore, il che equivale ad aumentare la reattanza di dispersione del trasformatore. Però è necessario avere valori non molto elevati di induttanza in quanto si avrebbero maggiori cadute di tensione, con conseguenze negative sull'alimentazione della linea di contatto. Per questo motivo i trasformatori scelti presentano una tensione di cortocircuito pari al 10% della tensione nominale.

3. IL SISTEMA A 3 KV A CORRENTE CONTINUA IN ITALIA

Tabella 3.5 Specifiche tecniche dei trasformatori di potenza utilizzati nelle SSE

DATI sui trasformatori di potenza			
Tipo	66 kV	132 kV	150 kV
Sigla	Yy0-Yd11	Yy0-Yyd11	Yy0-Yyd11
Tensione nominale primaria	63 kV ± 5.6%	125 kV± 8%	150 kV± 8%
Rapporto di trasformazione	63000/2710	125000/2710	150000/2710
Gradino di regolazione	1.902%	1.67%	1.67%
Campo di regolazione	± 12x1.902%	±12x1.67%	±12X1.67%
Potenza nominale	3880 kVA	5750 kVA	5750 kVA
Potenza del gruppo	2000-3600 kW	5400 kW	5400 kW
Peso complessivo	18760 kg	28000 kg	28000 kg
Peso olio	5500 kg	8500 kg	8500 kg
Dimensioni approssimative	3500x2000x4500	3800x3000x5100	3800x3000x5100
Tensione % di cortocircuito	Inferiore al 13.5% v.punto 3.1.10 Norma tecnica IE.TE		

- **Trasformatori dei servizi ausiliari**

Ogni gruppo dispone di un trasformatore per l'alimentazione dei circuiti ausiliari. Normalmente viene installato fra trasformatore di gruppo e parete del fabbricato del reparto a 3, sempre nel reparto in AT. Questo tipo di trasformatore è raffreddato in modo naturale, con avvolgimenti in bagno d'olio, inoltre presenta anch'esso il conservatore d'olio, il relè a gas, ecc. Viene alimentato da uno degli avvolgimenti secondari del trasformatore di gruppo con una tensione trifase pari a 2750 V, il rapporto di trasformazione è 2710/380 e, generalmente, la potenza è di 100 kVA.

Il reparto a 3 kV in corrente continua al chiuso

Tale reparto si trova subito dopo quello in AT all'aperto e i confine sono definiti, da una parte dai passamuro installati sul fabbricato e dall'altra parte dalle celle contenenti gli interruttori extrarapidi.

3. IL SISTEMA A 3 KV A CORRENTE CONTINUA IN ITALIA

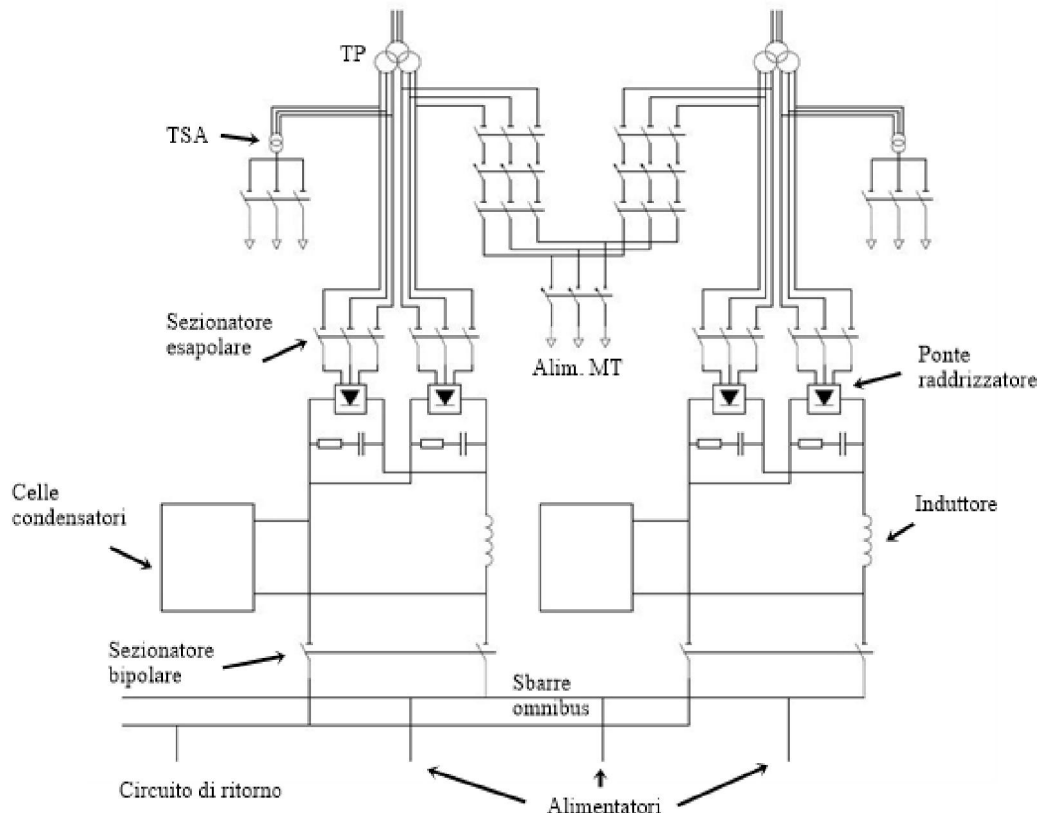


Figura 3.15 Schema elettrico del reparto 3 kV in corrente continua al chiuso

All'interno di questo fabbricato si trovano le seguenti apparecchiature:

- Fabbricati
- Passamuri e sezionatori esafasi
- Gruppi raddrizzatori
- Sbarre a 3 kV cc. sezionatori bipolari e collegamenti al circuito di terra e di ritorno
- Cella di misura
- Interruttori extrarapidi e celle relative
- Servizi ausiliari a ca e cc
- Sala quadri e quadro sinottico

➤ Fabbricati

Da diversi anni i fabbricati, delle SSE, vengono costruiti ad un solo piano, e quelli già esistenti a due piani hanno subito delle radicali modifiche, trasferendo all'aperto tutte le apparecchiature AT. Le dimensioni dei reparti si differenziano in relazione alla potenza e al numero dei gruppi convertitori e delle celle degli extrarapidi. Inoltre molte SSE sono telecomandate riducendo al minimo i locali per il personale e quindi si riducono le dimensioni. Inoltre, i moderni fabbricati delle SSE sono costruiti con strutture in muratura o in cemento armato, dove si pone attenzione sia ai problemi tecnici di funzionamento, sia alla prevenzione dagli infortuni e ad aspetti ergonomici e di impatto ambientale. La disposizione delle apparecchiature deve essere tale da minimizzare il più possibile la lunghezza dei collegamenti.

3. IL SISTEMA A 3 KV A CORRENTE CONTINUA IN ITALIA

➤ Isolatori passamuro e sezionatori bipolari

Gli isolatori passamuro hanno lo scopo di collegare i secondari dei trasformatori posti all'esterno ai sezionatori esapolari, dove questi sono disposti all'interno dell'edificio. Il collegamento viene effettuato tramite un tubo rigido di rame con diametro di 30 cm.

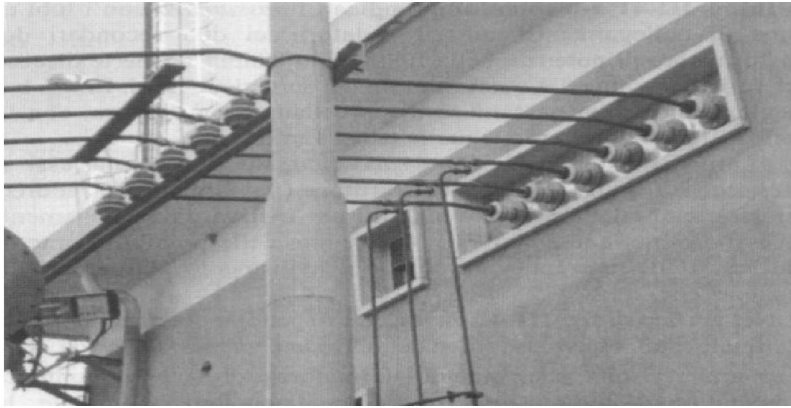


Figura 3.16 Vista dei sei isolatori passamuro

Il sezionatore esapolare si trova subito prima del raddrizzatore e, assieme al sezionatore bipolare, permette di isolarlo elettricamente dal resto dell'impianto. E' dotato di un blocco elettromagnetico, funzionante a 130 Vcc, che, per sicurezza, impedisce l'apertura del sezionatore se non è aperto l'interruttore di gruppo. E' dotato anche, di una scatola per la segnalazione luminosa, che può essere posizionata in prossimità del dispositivo di manovra o in vicinanza alle pinze del contatto del sezionatore.

➤ Raddrizzatori

Il raddrizzatore è il "cuore" di questo reparto. Nel corso degli anni ha subito diverse evoluzioni, dovute all'utilizzo di componenti elettrici con caratteristiche sempre più spinte. Andando a considerare i raddrizzatore a ponte Graetz e non quelli a vapori di mercurio, dato che sono completamente superati, si può notare come il numero di diodi, per ramo, sia andato sempre più a decrescere. Vediamo la differenza di come veniva realizzato il ponte raddrizzatore in passato e nelle più recenti SSE.

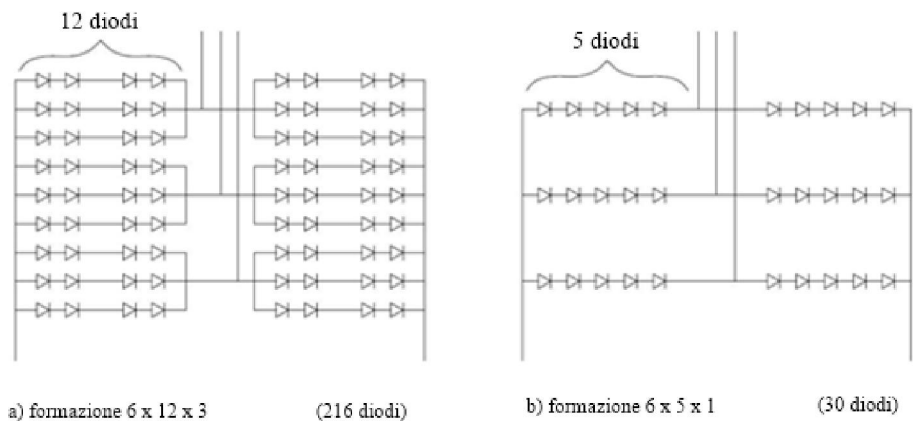


Figura 3.17 Schema di formazione del ponte raddrizzatore a) Schema superato b) Schema attuale

3. IL SISTEMA A 3 KV A CORRENTE CONTINUA IN ITALIA

Dalla figura si può notare che si è passati da una configurazione che prevedeva 216 diodi a una che ne prevede solamente 30, questo ha permesso di ridurre notevolmente l'ingombro.

Nelle SSE meno recenti erano stati impiegati diodi con caratteristiche di corrente e tensione inversa relativamente modeste e pertanto il collegamento assumeva un ruolo importante, infatti venivano connessi tra loro:

- I. In parallelo, per aumentare l'intensità di corrente raddrizzata
- II. In serie, per ripartire le tensioni inverse su più diodi

Tabella 3.6 Caratteristiche tecniche dei diodi utilizzati per i ponti raddrizzatori presenti nelle SSE

Caratteristica	Diodo vecchio tipo	Diodo di tipo recente
Tensione ripetitiva (V)	400	3000
Corrente media diretta in un periodo (A)	300	2700
Corrente di sovraccarico centrale (A)	5500	27000
Tensione inversa di picco ripetitiva (V)	1700	3000
Corrente inversa di picco ripetitiva (A)	20	75

Per il collegamento in parallelo era necessario che le curve dei diversi diodi non differiscano molto tra di loro, altrimenti le correnti nei rami in parallelo non potrebbero essere uguali. Per ridurre le differenze di correnti si utilizzano resistenze in serie ai diodi, ovviamente questo porta a una dissipazione di energia.

Il collegamento in serie è tuttora attuato per far fronte alle tensioni inverse elevate. Anche in questo le caratteristiche di due componenti devono essere simili, al fine di evitare che un diodo vada in interdizione prima degli altri, andando quindi a sopportare da solo l'intera tensione inversa con possibili danneggiamenti. Per ovviare a questo inconveniente si inseriscono in parallelo ai diodi delle resistenze di valore opportuno (circa 2000 Ω), in modo da far sì che le tensioni inverse si ripartiscono in modo quasi uguale senza notevoli dissipazioni di energia. Per proteggersi poi da tensioni inverse dovute a fenomeni molto rapidi (della durata di pochi microsecondi, p.e. transitori dovuti all'apertura di extrarapidi e fenomeni atmosferici), sono installati anche dei condensatori in parallelo al diodo, in serie ai quali vengono poste delle resistenze, per smorzare il transitorio di applicazione della tensione inversa. I condensatori utilizzati hanno una capacità di 0.5 μF , mentre quello delle resistenze è pari a 10 Ω . A valle del raddrizzatore viene posto anche un gruppo formato da due resistenze e un condensatore (RCR), che ha lo scopo di attenuare le sovratensioni di origine esterna o interna, sia lato alternata che lato continua. Il condensatore assume un valore di circa 10 μF ed è isolato in olio, mentre le due resistenze assumono un valore pari a 12 Ω ciascuna. Altro sistema di protezione del gruppo raddrizzatore è il dispositivo di rilevamento guasto diodi, che è in grado di segnalare tempestivamente un guasto presente in un diodo di un ramo, evitando il danneggiamento successivo di tutto il filare e dell'intero convertitore.

Il trasformatore utilizzato nelle SSE, come si è visto sopra, presenta due avvolgimenti con tensioni applicate sfasate di 30° elettrici, questo permette di poter collegare in serie o in parallelo due ponti raddrizzatori. La differenza principale tra i due diversi collegamenti è costituita dalle tensioni secondarie del trasformatore, che a parità di tensione raddrizzata devono essere diverse. Se si vuole ottenere una tensione raddrizzata a vuoto pari 3600 V, le tensioni nominali secondarie devono essere pari a 1355 V per un collegamento in serie dei ponti raddrizzatori, mentre per un collegamento in parallelo le tensioni assumono un valore di 2710 V. Il collegamento in parallelo richiederebbe poi l'inserzione di una bobina interfascica per una corretta suddivisione del carico tra i due ponti, ma questo viene di solito omesso dato che gli avvolgimenti del trasformatore compiono la stessa funzione.

3. IL SISTEMA A 3 KV A CORRENTE CONTINUA IN ITALIA

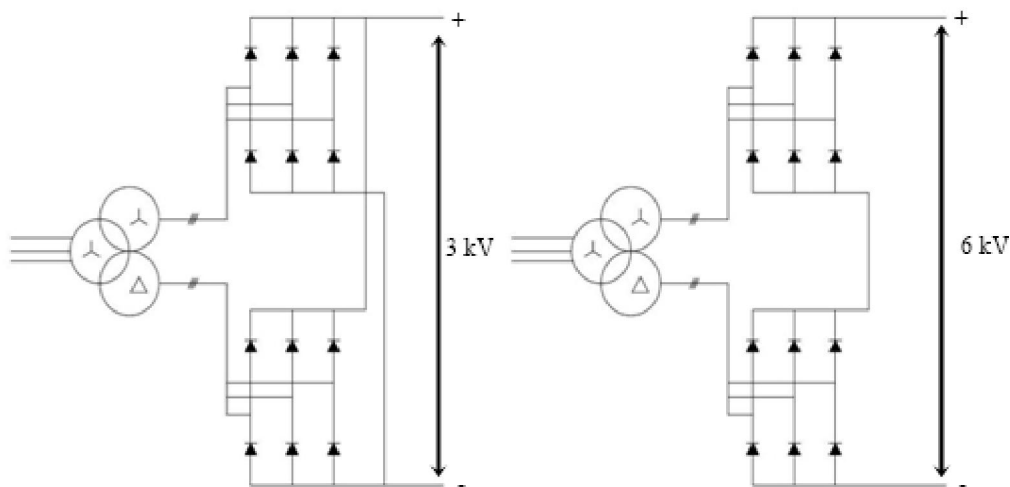


Figura 3.18 Collegamento di due ponti trifase a) in parallelo b) in serie

A partire dagli anni 60', le SSE venivano costruite dando per scontato un successivo innalzamento della tensione della linea di contatto da 3000 V a 6000 V. Per questo motivo venivano installati trasformatori con secondari di eguali caratteristiche, collegati in parallelo, in previsione di un loro collegamento in serie. Dato che le tensioni secondarie del trasformatore erano identiche si otteneva un raddrizzatore esafase, dove l'armonica dominante era quella 300 Hz, poi col passaggio al convertitore dodecafase (tensioni diverse sui secondari) l'armonica dominante è quella a 600 Hz. Questo determina una riduzione del ripple della tensione in uscita.

Un altro fattore molto importante è il raffreddamento dei diodi, infatti bisogna disporre i convertitori in locali ben ventilati, in modo da assicurare la migliore circolazione dell'aria e la massima possibile uniformità di raffreddamento.

➤ Sistema di filtraggio

Il sistema di filtraggio ha la funzione di bloccare le armoniche presenti nella tensione raddrizzata per evitare disturbi nelle linee di telecomunicazione e negli impianti di sicurezza. Attualmente i filtri adottati sono quelli aperiodici con disposizione a L, con il reattore in serie con la sbarra anodica e condensatori connessi in parallelo fra sbarra anodica e catodica. Ogni filtro deve essere installato fra le intelaiature del raddrizzatore e il sezionatore bipolare. Un tempo il sistema utilizzato era diverso, infatti si prevedeva un unico filtro per tutti i gruppi, con il reattore in serie alla sbarra catodica anziché anodica. Il sistema attuale risulta più razionale e sicuro e non comporta l'utilizzo di reattori di dimensioni e peso eccessivi. Il reattore è costituito da avvolgimento in aria ad asse verticale che presenta un valore di induttanza pari a circa 6 mH. La batteria di condensatori viene suddivisa in tre sezioni ciascuna con quattro condensatori, isolati in olio, da 30 μ F. La totale capacità installata sarà pari a 360 μ F. Ciascuna sezione è derivata fra la sbarra catodica e anodica tramite uno speciale sezionatore bipolare e valvola fusibile da 4000 V - 100 A. A batteria disinserita il sezionatore bipolare collega tra loro i terminali di una sezione, cortocircuitandola a terra

3. IL SISTEMA A 3 KV A CORRENTE CONTINUA IN ITALIA

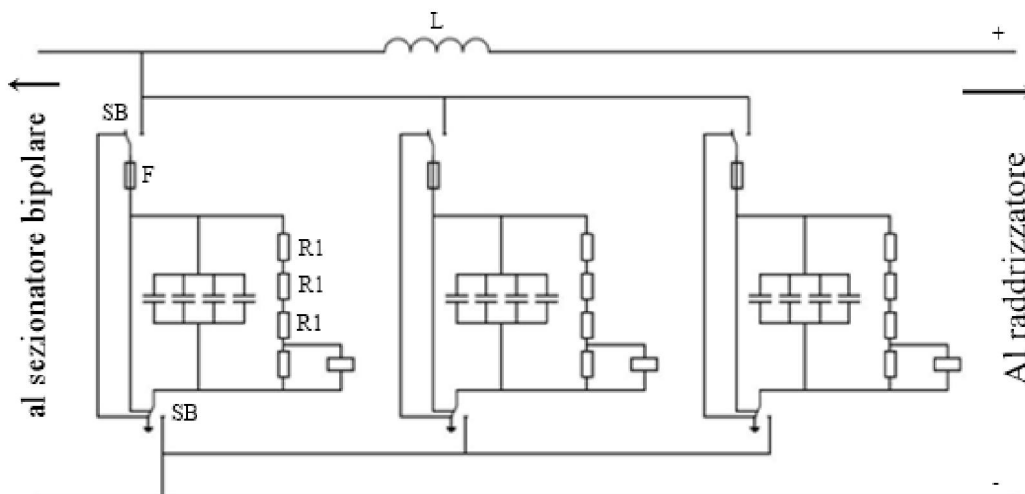


Figura 3.19 Schema elettrico di collegamento delle tre celle dei condensatore del filtro

Legenda:

SB- Sezionatore bipolare con lame di terra

C- Condensatori

F- Fusibile

R1- Resistenze di scarica

L- Induttanza di filtro

L'intervento del fusibile di protezione è regolato da un relè di minima tensione derivato ai capi di uno dei quattro resistori. Le sbarre omnibus sono installate su appositi isolatori, poggiati su mensole che corrono lungo le pareti dell'edificio, andando ad alimentare prima la cella misure e successivamente quelle contenenti gli interruttori extrarapidi. Solitamente la sbarra catodica è di colore azzurra mentre quella anodica è contraddistinta da un colore rosso della vernice.

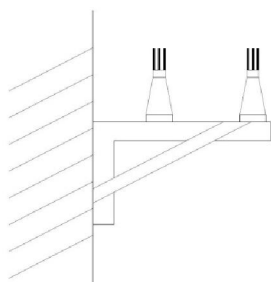


Figura 3.20 Particolare di isolamento e fissaggio delle sbarre omnibus

➤ Celle di misura e contenenti l'interruttore extrarapido

Le sbarre omnibus come prima cella incontrano quella di misura, che comprendono:

- Il dispositivo di misura dell'uscita a 3 kVcc, con voltmetro e amperometro indicatori e registratore dell'energia erogata dalla SSE;
- Il collegamento della sbarra catodica ai cavi del circuito di ritorno, che raggiungono le rotaie dei binari più vicini alle SSE;
- La valvola di tensione
- Il sezionatore bipolare

3. IL SISTEMA A 3 KV A CORRENTE CONTINUA IN ITALIA

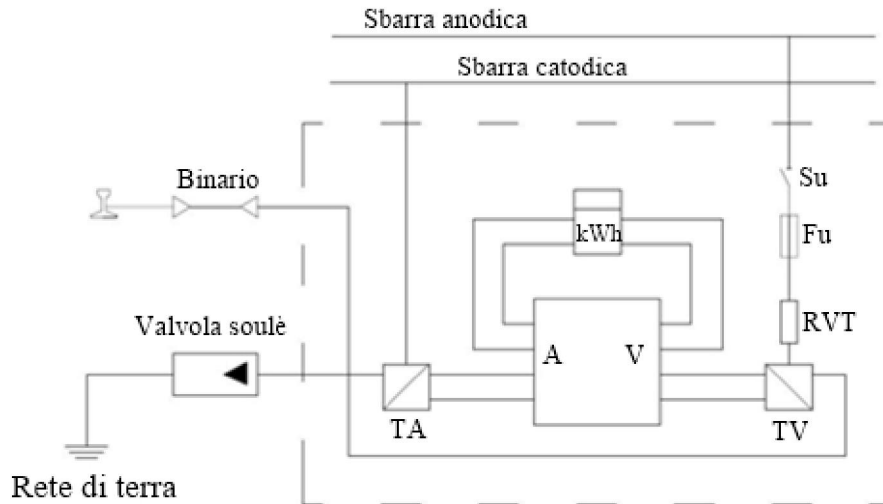


Figura 3.21 Schema elettrico dei collegamenti nella cella misure

In figura vengono indicati, il sezionatore bipolare SU, la valvola fusibile da 2 A col relativo partitore di tensione RVT da 6000/100 Vcc, lo shunt Sh da 3000 A - 80 mV, i trasduttori di isolamento TV e TA, gli strumenti per le misure di tensione sino a 4000 Vcc e di corrente sino a 3000 A e il misuratore di energia in kWhcc, inoltre è riportato anche il collegamento della sbarra catodica ai binari e alla valvola di tensione VSc. Quest'ultima non è altro che la valvola di soulè usata anche in linea, per collegare ai binari il circuito di protezione dei sostegni della linea di contatto. La valvola si attiva quando esiste una tensione di circa 200 Vcc fra rete di terra e sbarra catodica e lo scopo principale è quello di tenere separati (cioè metallicamente isolati) circuito di ritorno TE e rete di terra della SSE, per evitare corrosioni nei dispersori della rete di terra delle SSE quando il binario presenta un potenziale verso terra positivo a causa della circolazione dei treni.

Le celle contenenti gli interruttori extrarapidi sono di solito costruite in muratura e disposte in allineamento, sono affacciate agli isolatori passamuro a 3 kVcc. Nel corso degli anni hanno subito diversi mutamenti ai fini di evitare pericoli per la sicurezza del personale. Le sbarre omnibus alimentano quindi le celle contenenti gli interruttori extrarapidi, i dispositivi atti a rilevare e interrompere gli eventuali cortocircuiti che si possono verificare lato alimentazione ferroviaria. Ciascuna cella, un tempo, era accessibile da due lati,

3. IL SISTEMA A 3 KV A CORRENTE CONTINUA IN ITALIA

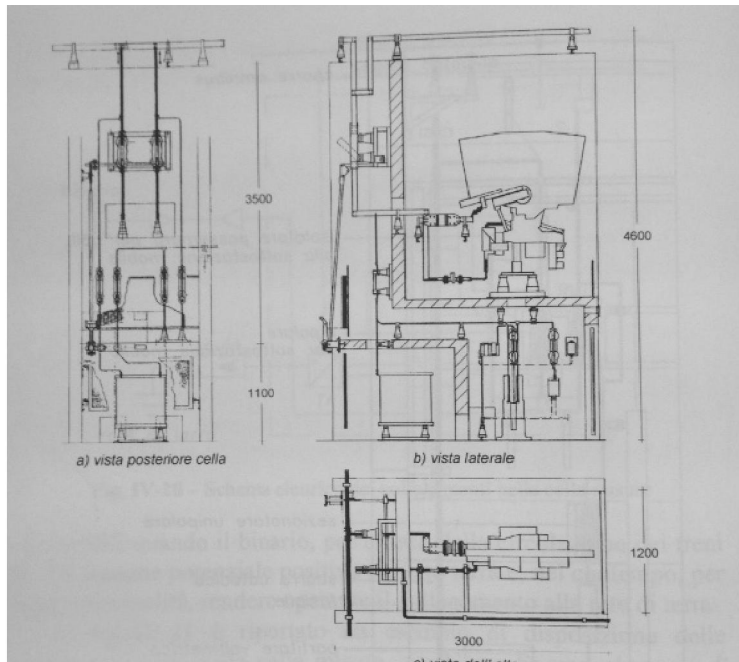


Figura 3.22 Disposizione delle apparecchiature in una cella di vecchio tipo

anteriore e posteriore, dove su quello posteriore si poteva trovare il sezionatore bipolare che serviva ad isolare l'extrarapido in entrata e in uscita; su quello posteriore, era ubicato l'extrarapido su una soletta intermedia; sotto la soletta erano installate le apparecchiature di auto richiusura e correva la sbarra catodica collegata a terra tramite la valvola soulè. A causa dei numerosi incidenti che si sono verificati, durante le operazioni di manutenzione, le celle vengono costruite con accessibilità da un solo lato

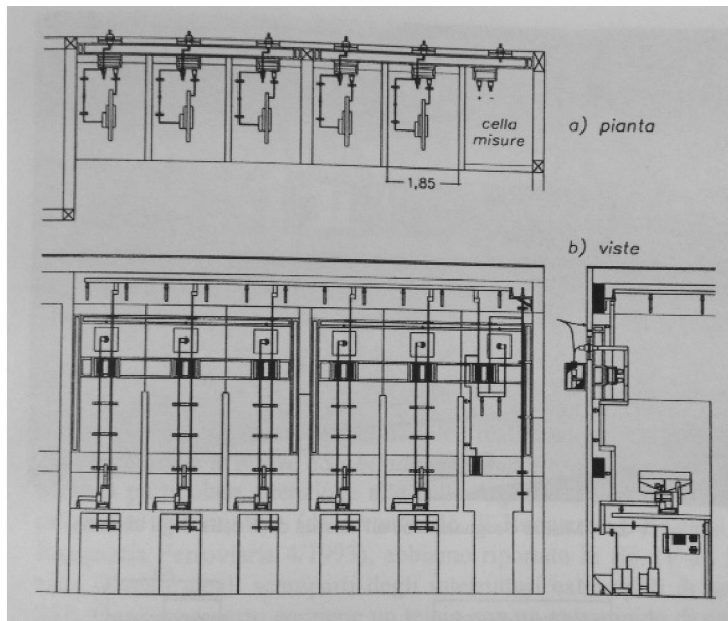


Figura 3.23 Esempio di disposizione delle celle degli interruttori extrarapidi accessibili da un solo lato

3. IL SISTEMA A 3 KV A CORRENTE CONTINUA IN ITALIA

e, inoltre, sono stati realizzati dei blocchi e segnalazioni per evitare ogni possibile disattenzione. Nelle realizzazioni più recenti l'ingombro è stato notevolmente ridotto e l'interruttore è estraibile.

➤ Interruttore extrarapido

Un interruttore extrarapido non è altro che un interruttore unipolare per corrente continua, che serve a proteggere la linea di contatto, per la rilevazione di guasti in linea e a bordo dei mezzi di trazione, dovuti a sovracorrenti. L'utilizzo di un interruttore in grado di limitare le correnti di corto circuito in pochi millisecondi (da qui l'appellativo extrarapido) risulta fondamentale per evitare un'eccessiva sollecitazione di tutti i componenti dell'impianto, dato che l'entità delle correnti di guasto è molto importante. Il fatto poi che la corrente da interrompere sia continua e non alternata, rende il tutto molto più complesso, non potendo l'interruttore sfruttare i naturali passaggi per lo zero della grandezza sulla quale deve intervenire.

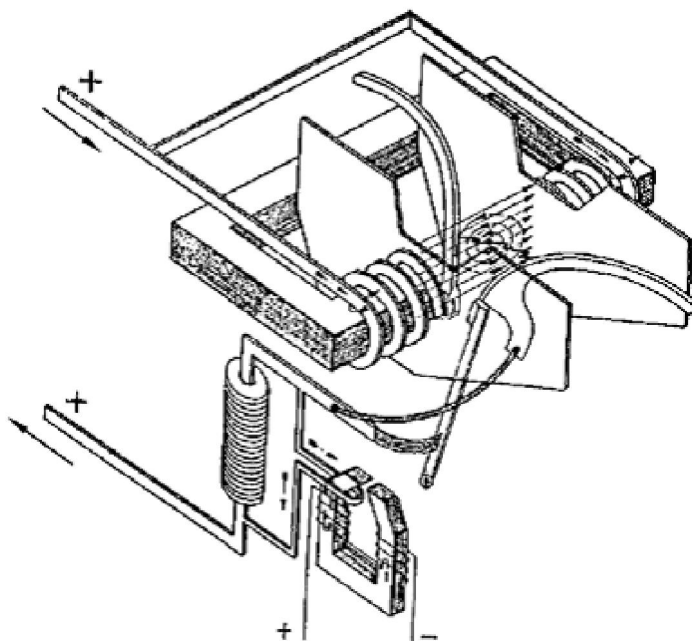


Figura 3.24 Principio di funzionamento del soffio elettromagnetico

Il principio di funzionamento di questo interruttore è basato quindi sull'allungamento dell'arco elettrico, creato dall'apertura dei contatti del dispositivo, e un suo successivo frazionamento, permettendone l'estinzione. Per ottenere questo risultato viene utilizzato un soffio elettromagnetico, creato dalla stessa corrente di guasto percorrendo delle spire con asse perpendicolare all'arco elettrico. Per la nota legge di Lorentz, si crea una forza sulla corrente che spinge l'arco fra due corni che si affacciano sui contatti che si sono aperti. Le corni conducono poi l'arco in un caminetto nel quale avviene la sua suddivisione in sezioni meno energetiche e quindi più facili da estinguere. Il comando di apertura può essere dato o dal dispositivo elettromagnetico di apertura o da uno shunt magnetico. Il primo è in grado di rilevare l'entità delle sovracorrenti, mentre il secondo è sensibile al gradiente di corrente, permettendo quindi un intervento più rapido nel caso di corto circuito vicino alla SSE. Dato che la frequenza dell'insorgere di guasti è abbastanza elevata, fondamentale risulta la presenza del dispositivo di prova terra, che consente la richiusura automatica dell'interruttore se è stata verificata l'assenza di un guasto permanente sulla linea. L'entità della corrente di guasto dipende dalla distanza alla quale si verifica la perdita di isolamento rispetto alla SSE; tanto più il guasto è vicino alla SSE, tanto più la corrente è elevata.

3. IL SISTEMA A 3 KV A CORRENTE CONTINUA IN ITALIA

Dato che le linee di contatto sono di norma alimentate un modo bidirezionale da due SSE attigue, risulta evidente che gli interruttori extrarapidi di entrambe devono poter rilevare un guasto che si verifica in qualsiasi punto della linea. La condizione più sfavorevole si ha con guasto vicino a una delle due alimentazioni, in quanto la corrente vista dall'altra SSE non è molto elevata.

Le tarature degli interruttori devono in questo caso essere mantenute basse, con rischi di scatti intempestivi, dovuti a normali correnti di carico.

Per ovviare a questo problema è stato introdotto un sistema di asservimento, che assicura la protezione della linea anche quando le tarature degli interruttori sono tenute più alte rispetto alla corrente di corto circuito che si verifica nel caso più sfavorevole (in prossimità di una delle due SSE). Questo accorgimento fa aprire entrambi gli interruttori quando almeno uno dei due ha rilevato una corrente di guasto. Ogni interruttore deve proteggere quindi solo metà tratta, con conseguente possibilità di aumento dei valori di taratura e riduzione degli scatti intempestivi. I nuovi sistemi di asservimento installati di tipo ASDE2 consentono la protezione della linea di contatto anche quando in linee a doppio binario sia effettuato il parallelo pari – dispari e prevedono l'interconnessione automatica dei dispositivi di asservimento di due SSE non attigue, quando quella centrale è in avaria.

➤ Servizi ausiliari, sala quadri

I servizi ausiliari sono gli impianti elettrici alimentati a bassa tensione. Essi funzionano in parte a corrente alternata, con tensione 380 V (trifase) e 220 V (monofase), e in parte a corrente continua, con tensione nominale a 130 V, inoltre sono necessari per il funzionamento dei circuiti di prova, di controllo e di allarme delle apparecchiature ad AT e a 3 kVcc.

Le apparecchiature in corrente alternata vengono alimentate dal trasformatore dei servizi ausiliari posto nel reparto AT della SSE. Tali apparecchiature sono:

1. I motori e motocompressori per la manovra degli interruttori e dei sezionatori;
2. L'alimentatore stabilizzato per la conversione a bassa tensione ca/cc occorrente per i servizi ausiliari;
3. Gli impianti di illuminazione e forza motrice;
4. Eventuali impianti di ventilazione
5. Alimentazioni per piastre telefoniche e telecomandi;

I servizi ausiliari in ca per motivi di continuità devono essere alimentati da due reti: una normale e una di riserva, quella normale è assicurata dal trasformatore dei servizi ausiliari dello stesso gruppo mentre quella di riserva è garantita da un trasformatore di un altro gruppo oppure dalla rete ENEL.

L'alimentazione a corrente continua è unificata al valore di 130 Vcc ed è ottenuta per mezzo di un alimentatore stabilizzato, collegato al circuito dei servizi ausiliari in ca, che realizza una conversione 380 Vca - 130 Vcc. L'alimentatore mantiene anche in carica una batteria di accumulatori a piombo, che in caso di anomalie può alimentare, per un certo tempo, le apparecchiature in cc senza dar luogo ad interruzioni. Le apparecchiature in cc possono essere suddivise in due gruppi:

Gruppo 1: relè, blocchi e automatismi vari

Gruppo 2: bobine di ritenuta di interruttori e sezionatori degli alimentatori a 3 kVcc, motori a cc per la chiusura degli interruttori e dei sezionatori degli alimentatori suddetti.

Tutte le apparecchiature della SSE devono essere facilmente comandabili e controllabili nel loro funzionamento dalla sala quadri, dove opera un tecnico preposto. Se la SSE è telecomadata, un certo numero di comandi e controlli, fa capo alla SSE pilota o al DOTE, ma ciò non esclude la presenzadella sala quadri, da utilizzare nel caso che la SSE stessa debba funzionare in regime di presenziamento per motivi di manutenzione o per guasti. Tale sale ospita gran parte delle attrezzature dei servizi ausiliari, ma l'elemento fondamentale della sala è l'elemento sinottico, uno schema dell'intera SSE realizzato con una serie di barre o striscie colorate, che riporta lo stato di tutti i componenti, facilitando l'individuazione di eventuali anomalie presenti. Il quadro viene ubicato in posizione idonea per l'operatore di SSE

Reparto a 3 kV in corrente continua all'aperto

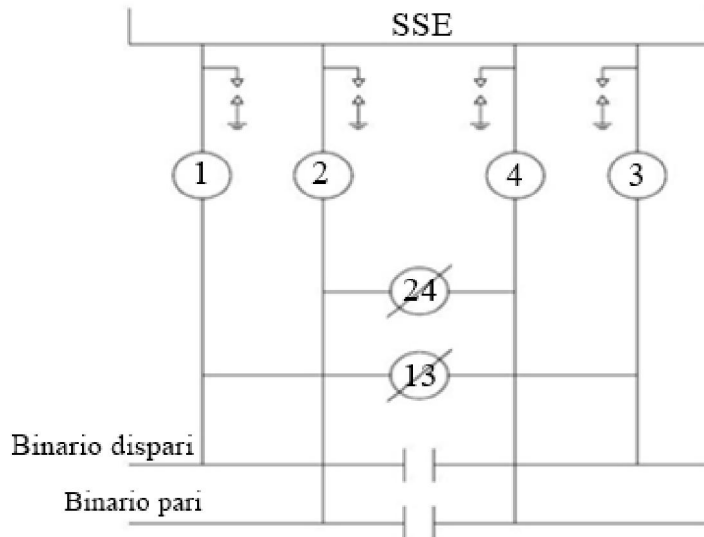


Figura 3.25 Schema del reparto alimentatori di una SSE con linea a doppio binario

Tale reparto inizia con gli isolatori passamuro affacciati alle celle degli extrarapidi e finisce in corrispondenza del recinto di SSE, a valle dei terminali dei sezionatori aerei ai quali sono collegati i conduttori. Lo scopo di questo ultimo reparto è quello di alimentare tutte le linee di afferenti alla SSE. I componenti principali del reparto sono:

- passamuro e scaricatori
- sezionatori e loro funzionamento
- le linee di alimentazione
- collegamento al negativo della SSE

➤ Isolatori passamuro e scaricatori a 3 kVcc

Gli isolatori passamuro sono gli stessi visti in precedenza, cioè quelli per i 2750 Vca. In questo caso, però, dopo il passamuro è installato uno scaricatore con lo scopo di bloccare le eventuali sovratensioni provenienti dalle linee di contatto, scaricandole a terra prima dell'intervento dell'interruttore extrarapido corrispondente.

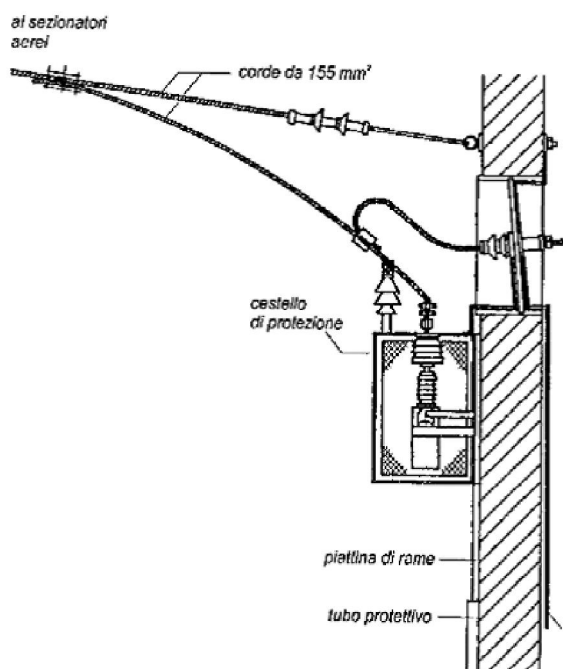


Figura 3.26 Vista dello scaricatore e dell'isolatore passamuro

Ogni scaricatore è posato su una mensola di profilati di acciaio fissata alla struttura muraria ed è racchiuso in un cestello di protezione di lamiera stirata, necessario per evitare danni alle persone e alle cose nel caso di accidentali rotture dello scaricatore stesso. L'efficienza e l'affidabilità degli scaricatori dipende dalle caratteristiche costruttive, e dai valori di resistenza della rete di terra alla quale l'uscita di ciascuno va direttamente connessa. Le parti metalliche dello scaricatore e dell'isolatore devono essere collegate a terra ma a monte del relè di massa. Lo scaricatore è composto da un condensatore di $4\mu\text{F}$, al quale viene posta una resistenza in parallelo di valore di circa 100Ω . Con queste caratteristiche, lo scaricatore presenta una tensione di innesco pari a 7- 10 kVcc, con durata di scarica di 1.2- 50 μs .

➤ Sezionatori

A valle dei passamuro, su degli appositi sostegni che di solito sono di tipo M, vengono installati i sezionatori in un numero pari al numero di interruttori extrarapidi presenti. Questi sezionatori sono detti di prima fila, successivamente si trovano quelli di seconda fila, atti ad assicurare la continuità delle alimentazioni al verificarsi di guasti e per consentire interventi di manutenzione. Ciascun sezionatore comprende:

- il sezionatore unipolare a corna vero e proprio
- la tiranteria per la manovra di apertura e di chiusura
- l'organo di manovra

Solitamente i sezionatori di prima fila sono chiusi, mentre quelli di seconda fila rimangono aperti. Una delle caratteristiche principali di questi sezionatori è la capacità, grazie alle corna spinterometriche, di aprire il circuito anche in presenza di correnti di intensità limitata, riuscendo ad allungare l'arco elettrico fino a spegnerlo.

3. IL SISTEMA A 3 KV A CORRENTE CONTINUA IN ITALIA

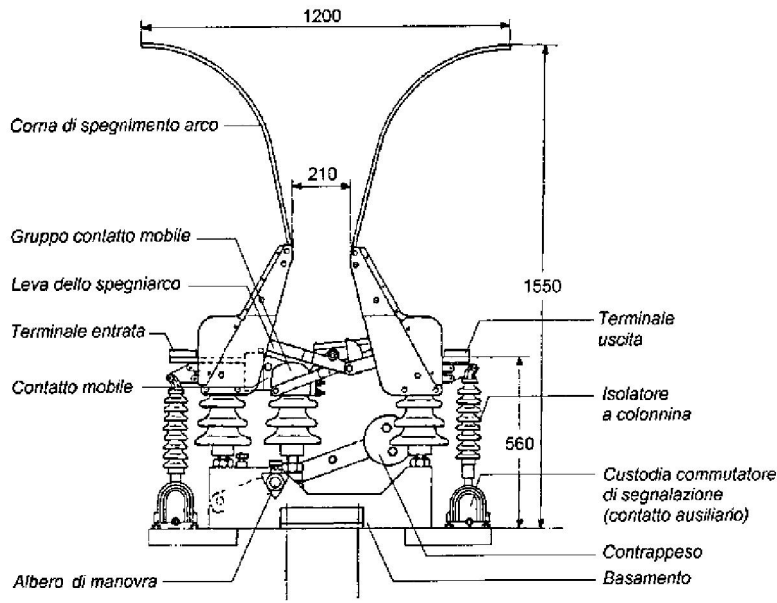


Figura 3.27 Schema di un sezionatore utilizzato nel reparto a 3 kV in corrente continua all'aperto

➤ Le linee di alimentazione

Le linee di alimentazione collegano i vari sezionatori e rendono possibile l'alimentazione della linea di contatto. Sono costituite da uno o più conduttori di rame, le caratteristiche sono riportate di seguito.

Tabella 3.7 Caratteristiche dei conduttori utilizzati per le linee di alimentazione

Composizione	Sezione dei conduttori (mm ²)	Sezione complessiva (mm ²)	Resistenza ($\frac{\Omega}{km}$)
1 corda	103	103	0182
2 corde	2 x 103	206	0.091

Il numero di corde da utilizzare dipende ovviamente dall'intensità del traffico previsto nella linea alimentata.

Il collegamento del circuito di ritorno alla sbarra catodica della SSE viene invece realizzato mediante appositi cavi, collegati al centro della connessione induttiva più vicina alla SSE stessa.

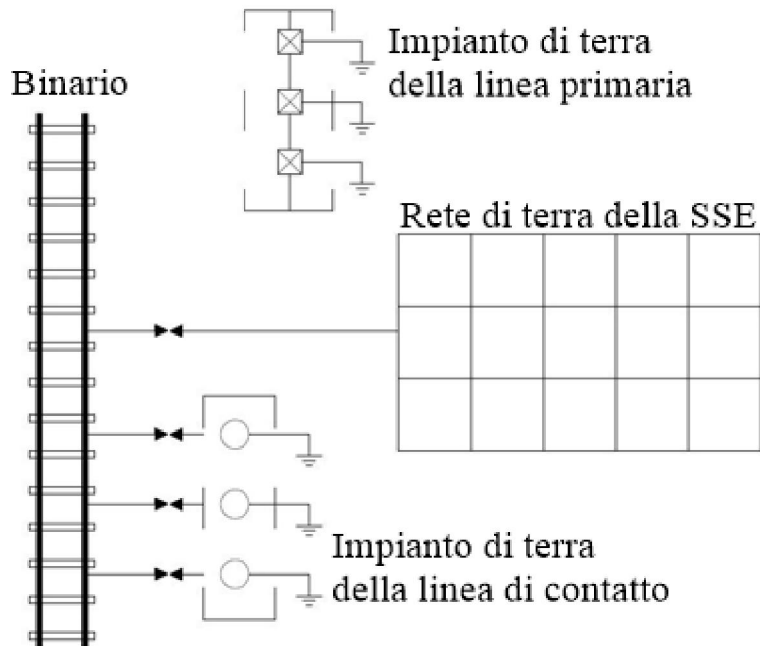


Figura 3.28 Rappresentazione schematica degli impianti di terra di SSE

Fondamentale per la sicurezza della SSE risulta l'impianto di terra, al quale devono essere collegate tutte le masse che, in caso di guasto, possono andare in tensione. Le linee primarie, le SSE e il circuito di alimentazione ferroviaria devono essere dotati di un proprio impianto di terra, indipendente l'uno dall'altro nel normale esercizio. Solo in caso di possibili pericoli dovuti a gradienti di tensione troppo elevate in prossimità della SSE, è previsto il collegamento dell'impianto della SSE con quello del circuito di ritorno, abbassando conseguentemente l'impedenza del sistema dispersore e quindi riducendo il rischio di raggiungere tensioni di passo o di contatto troppo elevate. Sempre per motivi di sicurezza, i collegamenti delle masse verso terra sono raggruppati in settori, ognuno dei quali insiste su un relè (relè di massa), in grado di individuare quando vi è la presenza di una corrente di guasto e di far scattare l'interruttore generale di SSE. Solitamente l'impianto di terra è costituito da una maglia di corde di rame nudo, più larghe verso il centro della SSE, interrate a una profondità superiore a un metro, coronata da picchetti dispersori posti in pozzetti ispezionabili. Nella sua realizzazione, non deve presentare una resistenza superiore a 1Ω . Per informazioni dettagliate si rimanda a [2], [3] e [4].

3.2.3 La linea di contatto

Le linee di contatto sono quella parte dell'impianto che garantisce l'alimentazione dei convogli, inoltre essa risulta alimentata dalle SSE adiacenti, da ambedue gli estremi. Tutte le linee di contatto di una SSE risultano in parallelo tra di loro, come si può notare dalle figura sottostante, tramite gli interruttori di linea J_L .

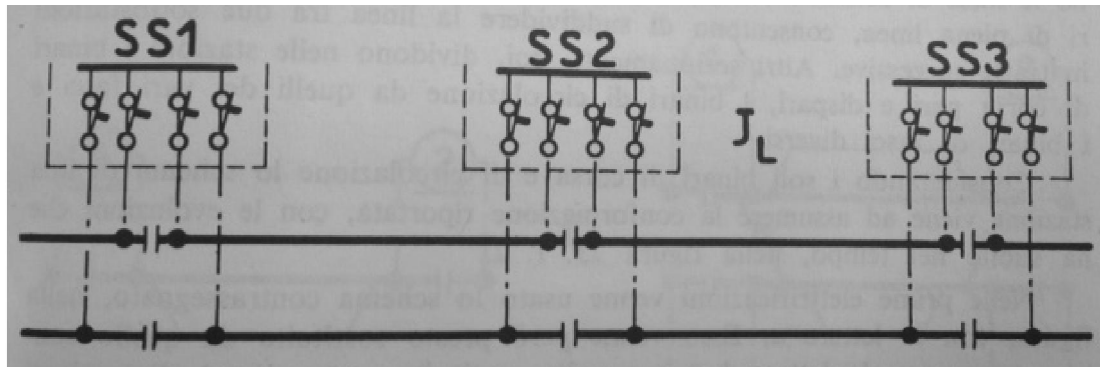


Figura 3.29 Schema di massima dell'alimentazione della linea di contatto.

In definitiva la linea di contatto di ciascun binario di una intera linea costituisce un unico circuito elettricamente continuo e, nel caso di linee a doppio binario, il circuito pari ed il circuito dispari sono in parallelo in tutte le sottostazioni nonché nei punti di sezionamento automatico e parallelo di metà tratta tra una sottostazione e l'altra.

La continuità del circuito può dar luogo a correnti entranti ed uscenti dalle sbarre di una SSE. Infatti, possono verificarsi valori di tensione in uscita e di distribuzione dei carichi tali che treni circolanti tra le SSE uno e due possono essere alimentati da correnti provenienti dalla sottostazione tre. Questo fenomeno che, quando non ci sono grossi errori nel posizionamento dei variatori di tensione dei trasformatori di gruppo di una sottostazione in relazione ai valori reali medi della tensione di alimentazione primaria, non è da considerarsi come un'anormalità di cui sia necessario preoccuparsi. L'intero circuito unico deve essere sezionabile in corrispondenza delle SSE e lungo la linea allo scopo di poter disalimentare, in caso di guasto o manutenzione, solo tratte di lunghezza relativamente limitata. I sezionamenti avvengono attraverso diversi sistemi, mentre la continuità della linea viene conservata mantenendo chiusi dei sezionatori inseriti secondo uno schema opportuno.

➤ Sistemi di sospensione

Una linea di contatto perfetta dovrebbe avere le seguenti caratteristiche:

- avere il conduttore, o i conduttori, di contatto ad altezza costante;
- mantenere la costanza dell'altezza anche al transito dei convogli, ovvero presentare una cedevolezza nel piano verticale eguale in ogni suo punto;
- mantenere i conduttori di contatto lungo l'asse della via ovvero, se come di norma nella grande trazione si usano pantografi con striscianti, secondo uno zig-zag simmetrico rispetto a detto asse;
- non risentire in maniera apprezzabile dell'azione di vento laterale

Queste sono condizioni ideali difficilmente si possono realizzare al cento per cento ma comunque si tende ad avvicinarsi il più possibile.

Il sistema di sospensione più semplice è quello trasversale o tramviario, in cui il conduttore di contatto è semplicemente sorretto da mensole applicate, trasversalmente alla linea, su pali di sostegno. Con una campata di soli 35 metri e pur mantenendo tiri massimi di 10 kg/mm^2 , si possono raggiungere nelle condizioni massime di temperatura valori di freccia dell'ordine dei 50 centimetri. Il pantografo ferroviario presenta una massa non trascurabile e per seguire, con il treno in movimento, la continua differenza di livello del conduttore di contatto, sarebbe obbligato continuamente a sollevarsi e abbassarsi cosa che, al crescere della velocità del treno, finisce con il provocare distacchi dello strisciante dal filo nella seconda metà della campata ove il filo si innalza, ed urti contro il filo stesso nella successiva mezza campata ove il filo si abbassa.

3. IL SISTEMA A 3 KV A CORRENTE CONTINUA IN ITALIA

Questo porta ad una cattiva captazione della corrente capace sia di danneggiare meccanicamente e elettricamente gli striscianti e la linea stessa e sia di produrre, nel circuito dei motori, sovratensioni da interruzione brusca della corrente con conseguente pericolo di adescamento di archi. Per quanto appena detto le sospensioni trasversali vengo utilizzate solo su binari secondari da percorrersi a basse velocità.

Per quanto riguarda la cedevolezza della linea di contatto essa è in genere, per qualsiasi tipo di sospensione, maggiore a metà campata anzichè sotto sospensione.

Dopo aver così accennato a quelli che sono i problemi che si incontrano per ottenere una buona captazione di corrente da una linea di contatto possiamo passare a vedere come i problemi stessi siano stati risolti con il sistema detto a sospensione longitudinale in cui una fune portate superiore sorregge uno o più fili di contatto².

La fune portante, per mezzo di pendini opportunamente intervallati, i fili di contatto in modo che essi siano il più possibile in un piano orizzontale. La lunghezza dei pendini può essere predisposta in modo tale che i punti in cui essi sorreggono il conduttore di contatto si trovino tutti alla stessa altezza, almeno quando la temperatura ambiente è al valore medio della escursione massima prevedibile nella zona. I pendini sono fili di rame di 5 mm e sono accavallati alla fune o ad opportuni cavallotti di scorrimento sorretti dalla fune, e sorreggono i conduttori a mezzo di morsetti. A causa della presa di questi ultimi il conduttore di contatto è sagomato e cioè dotato di apposite scanalature longitudinali continue. La sezione trasversale del conduttore è di 100 mm^2 usato dalle FS per le loro linee di contatto.

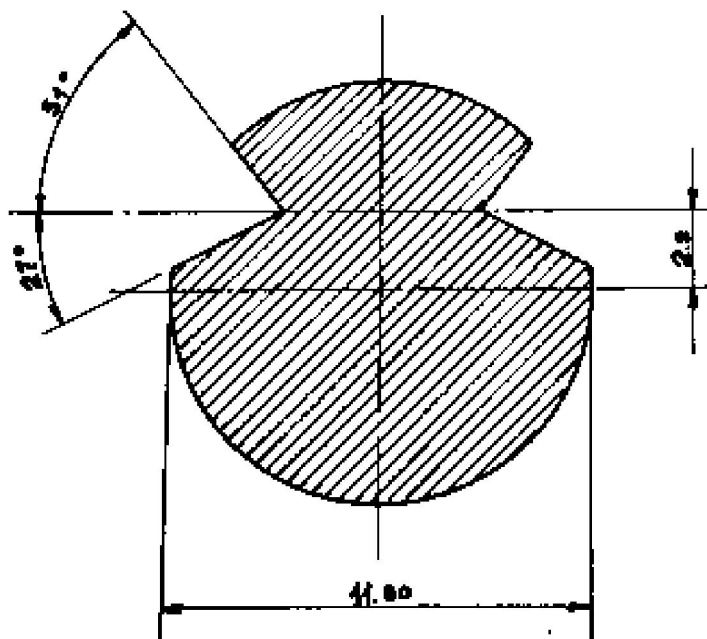


Figura 3.30 Sezione del filo di contatto sagomato

la sezione del conduttore di contatto è invece pari a 150 mm^2 . Nelle linee FS i pendini che sorreggono lo stesso conduttore di contatto sono tra loro distanziati di otto metri e la freccia che il conduttore assume è quindi quella di una campata di tale lunghezza e ciò sino a tanto che la temperatura è al valore medio di cui abbiamo parlato. Al variare della temperatura il filo di contatto si dilata o si ritrae ma questo non ha nessuna influenza nelle linee in quanto il conduttore è sempre ormeggiato, agli

² Per linee a 1500 V, come quelle francesi, viene usata una catenaria compound nella quale la fune portante principale regge, con normali pendini, una fune ausiliaria intermedia ed è a quest'ultima, che assume posizione quasi orizzontale, che viene affidato l'incarico di reggere, con pendini che assumono forma di staffe, i fili di contatto.

3. IL SISTEMA A 3 KV A CORRENTE CONTINUA IN ITALIA

estremi, con sistemi di contrappesatura, compensando la variazione di lunghezza, ne mantengono invariato il tiro.

La massima freccia della campata di fili di contatto sarà quindi praticamente data da

$$f = \frac{f_{max} - f_{min}}{2}$$

e sarà ovviamente positiva in estate e negativa in inverno, questo lo possiamo vedere dalla figura seguente.

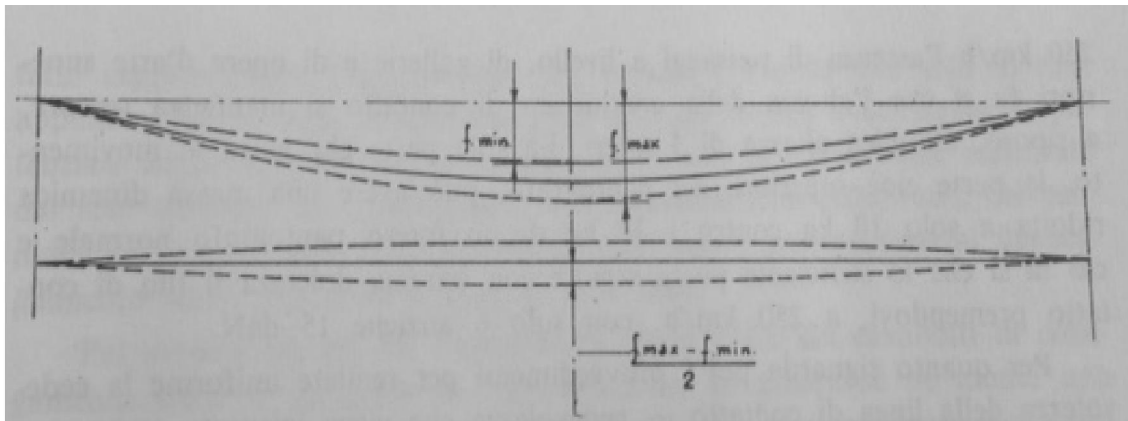


Figura 3.31 Variazione della freccia al variare della temperatura

Con normali campate da 60 m si hanno frecce massime di 20 centimetri cosa che consente un'ottima captazione della corrente anche a velocità dell'ordine dei 140 km/h.

Per velocità più elevate è necessario ridurre anche tale basso valore di freccia e ciò viene ottenuto contrappesando agli estremi anche la fune portante. Resta quindi a riposo la sola freccia dovuta alla minima campata di 8 metri ed anzi tale freccia è praticamente dimezzata dal fatto che i pendini di un conduttore sono alternati con quelli dell'altro.

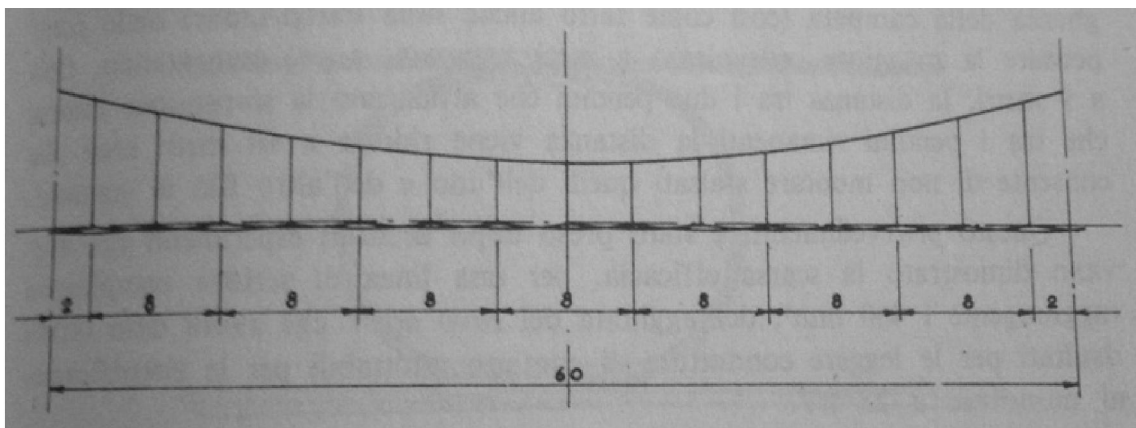


Figura 3.32 Campata tipo da 60 metri

Un altro tipo di sospensione utilizzata è quella ad Y che aveva dato ottimi risultati per le leggere condutture di contatto adottabili per le elettrificazioni monofase a 25 kV.

3. IL SISTEMA A 3 KV A CORRENTE CONTINUA IN ITALIA

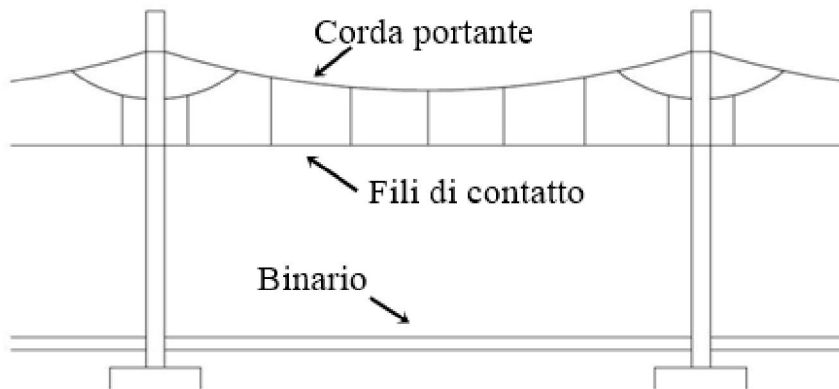


Figura 3.33 Sospensione longitudinale con corda portante a Y

Ad esempio in Francia con l'aggiunta del cavo ad Y, consistente in un breve tratto di corda in corrispondenza della sospensione così come possiamo vedere nella figura di sopra, si è riusciti a ridurre al solo 20% contro il 64% delle linee normali, il coefficiente di irregolarità della elasticità, dato dalla formula

$$\frac{e_{max} - e_{min}}{e_{max} + e_{min}}$$

dove e rappresenta il rapporto di sollevamento in millimetri della linea e lo sforzo in chilogrammi che lo provoca.

Nelle figura seguente possiamo vedere come sono realizzati i cavallotti di continuità per linee a due o un conduttore di contatto

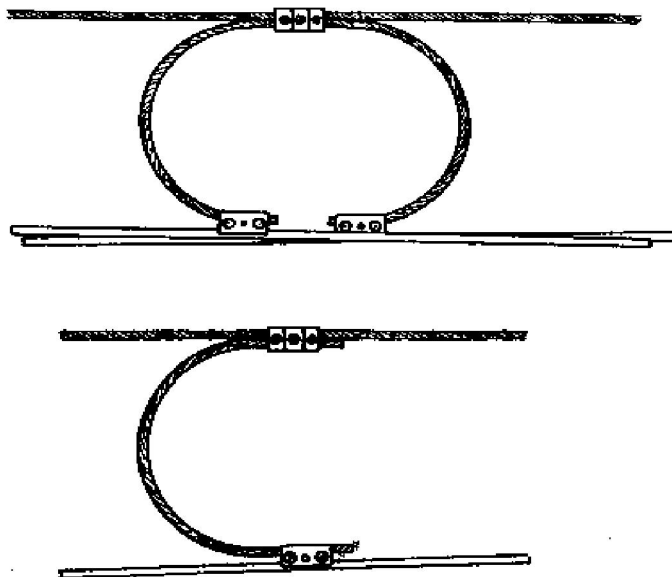


Figura 3.34 Cavallotto di continuità per linee a due ed a un filo di contatto

3. IL SISTEMA A 3 KV A CORRENTE CONTINUA IN ITALIA

➤ *Sostegni*

Il tipo di sostegno più diffusamente impiegato nelle elettrificazioni ferroviarie è il palo anche se non mancano esempi di linee di contatto sostenute da portali a cavallo dei binari. In corrispondenza di più binari paralleli, e quindi essenzialmente nelle stazioni, non è mancato un tempo nelle FS, ed esiste ancora in qualche ferrovia estera, qualche esempio di sospensione funicolare trasversale retta, ai due estremi, da pali a traliccio. In galleria, in corrispondenza di cavalcavia nonché su ponti a travate tubolare, la linea viene sostenuta da apposite grappe murate o comunque collegate ad opera d'arte.

I pali adoperati sono praticamente sempre metallici anche se non mancò, nelle prime elettrificazioni americane, qualche esempio di impiego di palificazioni in legno e vi sia ancora qualche ferrovia che impiega pali in cemento armato, centrifugato o vibrato, comunque la preferenza ad utilizzare pali metallici è data dalla loro lunga durata specie quando si usano pali zincati.

Come pali in ferro le FS per molti anni hanno usato esclusivamente pali tubolari del tipo Mannesmann, ancora oggi denominati serie M, pali di cui esiste una serie molto completa che vede variare i dati fondamentali dei tipi più usati entro i seguenti limiti:

- lunghezza tra 8,4 e 11 metri;
- peso tra 230 e 720 kg;
- modulo di resistenza alla base tra 195 e 570 cm^3 ;

Questo consente di scegliere sempre il palo più adatto in relazione al numero di binari da servire, alla presenza o meno di alimentatori montati in cima all'ormeggio al palo di conduttore.

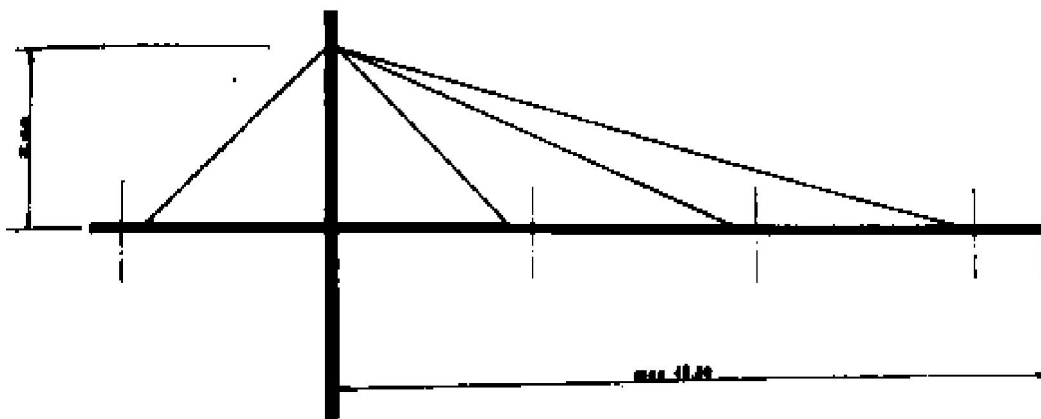


Figura 3.35 Palo di stazione

dalla figura possiamo vedere come sia necessario mantenere una distanza di 2 metri, contro i normali 80 cm, tra attacco al palo della mensola e dei tiranti, rende necessario l'utilizzo di un palo lungo almeno un metro in più quando si debba garantire una inclinazione sufficiente ai tiranti più lunghi per reggere una mensola per tre binari. Successivamente ai pali delle serie M sono stati preferiti quelli della serie LS che, a parità di prestazioni, risultano più leggeri ed economici.

Si tratta di pali a leggero traliccio, a sezione rettangolare, ottenuti con due ferri profilati ad U, in acciaio FE.42, saldati per lembi tramite una tralicciatura a zig-zag. Le dimensioni dei ferri sono differenti a seconda del tipo di palo. Anche di questa serie esistono diversi tipi differenti che vanno, come dimensioni caratteristiche:

- da 175 a 620 kg per il peso;
- da 8,20 a 13 metri per l'altezza;
- da 298,1 a 1013,6 cm^3 e da 26,5 a 191 cm^3 per i due momenti resistenti alla base.

3. IL SISTEMA A 3 KV A CORRENTE CONTINUA IN ITALIA

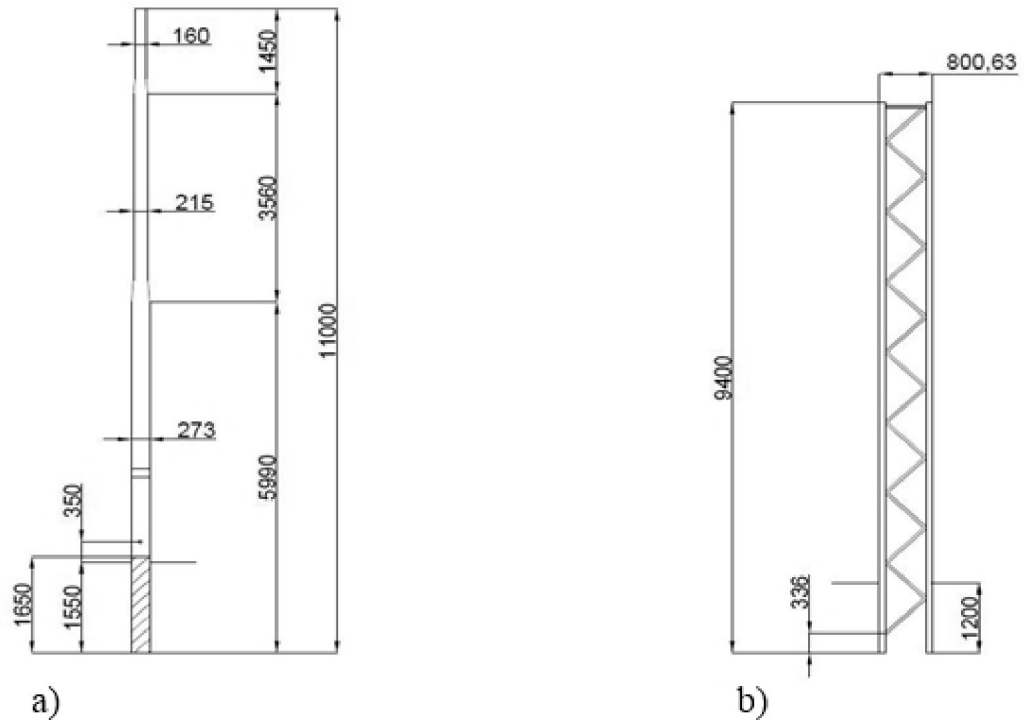


Figura 3.36 Viste delle principali tipologie di pali utilizzati: a) Pilo di tipo M30 b) Pilo tipo LS

I pali metallici, qualsiasi serie siano, vengono fissati in blocchi di calcestruzzo di opportune dimensioni, in funzione del momento flettente massimo cui, anche per l'azione del vento sulle condutture e sui pali stessi, il palo può risultare assoggettato, nonché della posizione della fondazione in trincea od in piano od in rilievo.

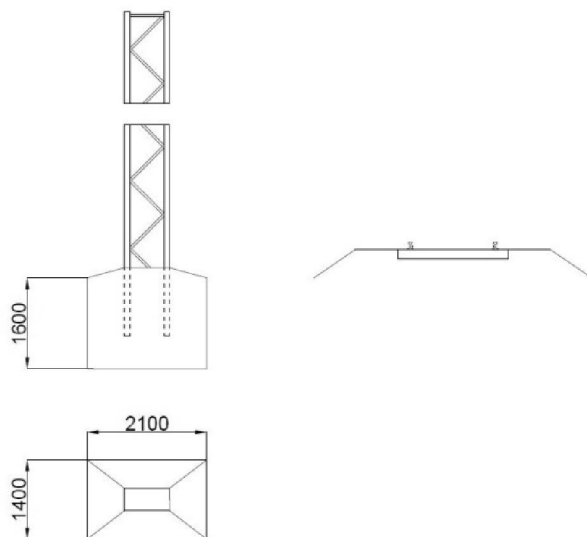


Figura 3.37 Blocco di fondazione per pali tipo LS (misure in mm)

Nella direttissima Roma-Firenze è l'intera linea, compresi i posti di comunicazione con qualche binario di precedenza, che vede la linea di contatto sorretta da portali.

3. IL SISTEMA A 3 KV A CORRENTE CONTINUA IN ITALIA

Ciò è conseguenza della previsione di velocità superiori a 200 km/h. Le esperienze fatte in proposito avevano infatti dimostrato la indispensabilità di sostegni con rigidità trasversale superiore a quella dei normali pali che,

investiti dallo spostamento d'aria dovuto al transito di treni molto veloci, intervenivano pure essi nel creare forti oscillazioni alle linee di contatto.

Il tipo di portale adottato ha una cerniera di base, nel piano trasversale, cosa che riduce la possibilità di propagazione al portale stesso delle vibrazioni impresse dai treni alla sede e che consente di non trasmettere momenti trasversali alle fondazioni, cosa particolarmente importante quando i portali risultano direttamente montati sulla parte a sbalzo degli impalcati dei numerosi viadotti della linea.

A conclusione di questo paragrafo, le norme tecniche delle FS prescrivono, per le nuove elettrificazioni, le seguenti distanze tra sostegni e bordo interno della più vicina rotaia:

- sostegni di piena linea: 2,25 metri;
- sostegni di stazione:
 - a) su binari di corsa
 - b) per binari di precedenza o di incrocio
 - c) per binari secondari

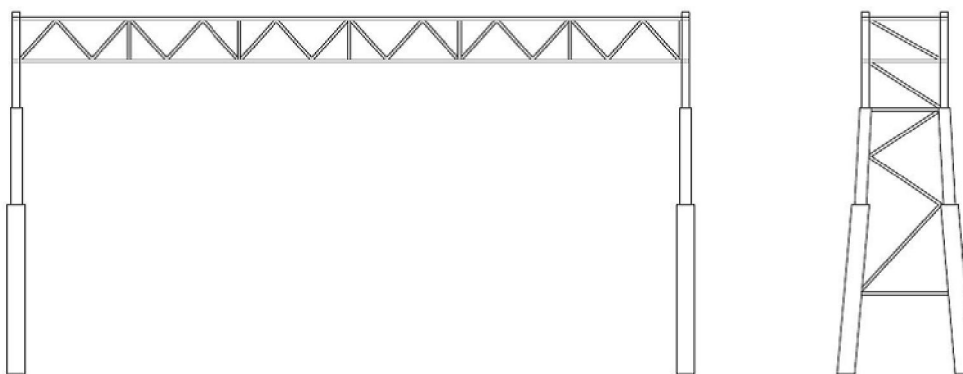


Figura 3.38 Esempio di portale per ormeggio per tre binari a travata rettangolare

➤ *Lunghezza delle campate. Poligonazione*

Nei tratti in rettilineo la lunghezza massima di una campata della linea di contatto a sospensione longitudinale dipende dalla distanza alla quale la sospensione metallica ed isolante mantiene fune e fili in corrispondenza dei sostegni. La freccia massima della fune e, quindi, la lunghezza massima della campata dipendono da tale distanza e dalla lunghezza minima che si considera accettabile. Generalmente la distanza tra fune di guardia e filo di contatto, sotto sospensione, è di circa un metro e quaranta centimetri il che, con le tesature normalmente impiegate, fa sì che, fissando in 20 centimetri la lunghezza minima del pendino centrale, si possono realizzare campate di 60 metri. Le FS assumono come standard questa lunghezza per le campate delle tratte in rettilineo ed allo scoperto. Nelle gallerie, salvo che in quelle di più recente costruzione, si hanno sagome tali da imporre distanze tra fune e fili, sotto sospensione, molto minori e ciò fa sì che la campata massima in rettilineo si riduca a 30 od anche solo 20 metri. Nelle tratte in curva vi è un altro fattore che interviene ad imporre una limitazione, al di sotto dei sessanta metri, della lunghezza delle campate. I conduttori di contatto, infatti, nelle curve sono sorretti agli estremi di ogni campata e si dispongono nel piano orizzontale secondo una secante alla curva descritta dall'asse del binario, questo lo si può vedere nella figura successiva.

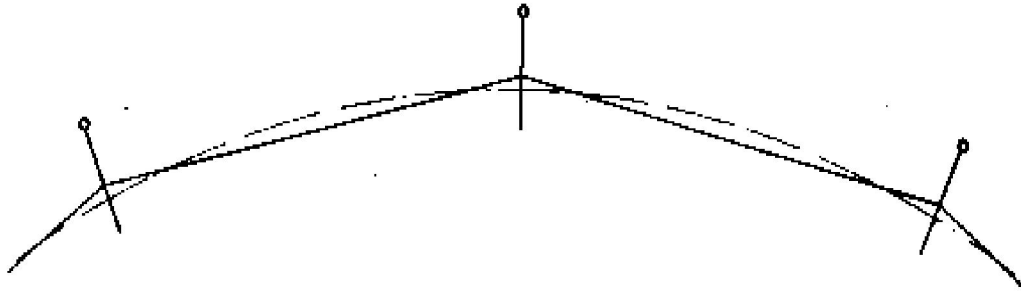


Figura 3.39 Poligonazione in curva

Da essa si può vedere che il disassamento del conduttore non può superare un certo limite, definito dalla lunghezza degli striscianti dei pantografi, ne consegue che la campata deve essere mantenuta tanto più corta quanto minore è il raggio della curvatura della linea.

Il massimo spostamento ammissibile dei conduttori di contatto rispetto all'asse della curva è quello stesso, di 20 centimetri da un lato o dall'altro, che viene creato, con un opportuno montaggio delle sospensioni nelle tratte in rettilineo, per far sì che il conduttore si disponga, in proiezione orizzontale, secondo uno zig-zag per evitare solcature sugli striscianti dei pantografi. Si può quindi affermare che la poligonazione che si è costretti a dare in curva ai conduttori di contatto realizza direttamente anche a poligonazione comunque necessaria anche in rettilineo.

Infine per ridurre le disuniformità che possono influire sulla buona captazione di corrente, è buona regola evitare notevoli differenze di lunghezza tra campate subito successive, infatti, le norme FS prescrivono che tra campate successive non vi siano differenze di lunghezza superiori ai 10 metri, limite da ridursi a due metri nel caso di elettrificazione per linee a velocità superiore ai 180 km/h.

➤ *Mensole e sospensioni metalliche ed isolanti. Altezza della linea di contatto*

In una linea di contatto a sospensione longitudinale ai sostegni vengono fissate delle mensole che sorreggono un complesso, chiamato sospensione metallica ed isolante, avente lo scopo di reggere la fune portante e di guidare, per ottenere la voluta poligonazione, i fili di contatto.

La sospensione deve consentire una cedevolezza, nel piano verticale, dei fili di contatto che si cerca di far sì che non risulti molto inferiore a quella naturale metà campata e deve anche consentire i movimenti nel piano orizzontale conseguenti alle escursioni della dilatazione termica dei conduttori ad ormeggio contrappesato. I tipi di mensole e sospensioni che si riscontrano per le ferrovie in tutto il mondo sono svariati, per l'elettrificazione 3000 V in corrente continua, la introduzione di miglioramenti necessari, specie a seguito dell'aumento di velocità, nelle prestazioni hanno fatto sì che due tipi fondamentali differenti, ciascuno con le sue varianti dovute al diverso tipo di isolatori impiegato. Fino alla metà degli anni 50 la rete FS era gestita con una corda non contrappesata e venne di conseguenza impiegato il seguente tipo di sospensione

3. IL SISTEMA A 3 KV A CORRENTE CONTINUA IN ITALIA

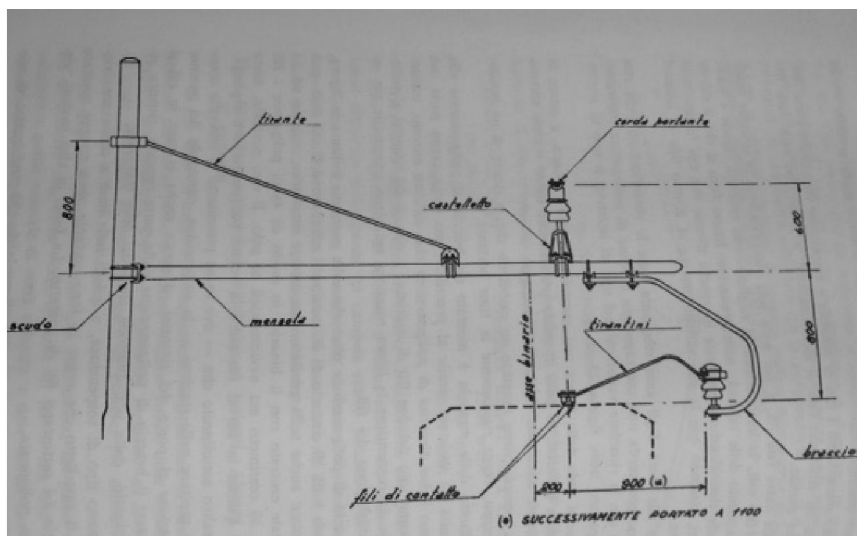


Figura 3.40 Palo, mensola e sospensione con isolatori

come si può notare dalla figura una mensola tubolare è fissata, a mezzo di uno scudo a collarini, al palo in modo praticamente rigido e viene sorretta da un tirante anch'esso rigidamente collegato al palo. Sulla mensola viene montato un castelletto che, a mezzo di un isolatore con cappa, regge rigidamente la fune portante. Al disotto della mensola è montato un braccio di poligonazione alla cui estremità un isolatore simile al precedente ma senza cappa porta con un collarino i due tirantini di poligonazione che, all'altro estremo, trattengono ciascuno uno dei due fili di contatto. L'attacco dei tirantini al collarino è tale da consentire la libera rotazione nel piano orizzontale per seguire la dilatazione dei fili.

Il braccio di poligonazione oltre che nella posizione indicata in figura, che poligona i fili di contatto di 20 centimetri allontanandoli dal palo, può essere montato anche nella posizione esattamente simmetrica, rispetto ad un asse verticale centrato con il binario, in modo da fargli poligonare i fili sempre di 20 centimetri ma avvicinandoli al palo. E' così possibile realizzare la voluta poligonazione a zig-zag sia in rettilineo che in curva. Nelle sottostazioni la sospensione, montando dei puntoni di poligonazione al posto dei tirantini, si presta anche al caso in cui si debba montare il braccio di poligonazione dalla parte opposta, rispetto all'asse del binario, della poligonazione che esso va a realizzare. Con questo tipo di sospensione il castelletto che regge la fune portante viene sempre montato sulla verticale dei sottostanti fili di contatto, in altre parole la fune viene anch'essa poligonata. Tale sistema consente l'impiego di corde da 120 mm^2 quanto di corde da 65 mm^2 e, con l'impiego di un tirantino invece che due, può essere utilizzata anche per linea con un sol filo di contatto. La sospensione descritta mantiene tra corda e mensola una distanza di 60 cm e di 80 cm tra mensola e fili questo consente campate massime di 60 metri. I pali della serie M presentano rastremazioni tali da consentire il montaggio delle mensole all'altezza necessaria per mantenere i fili di contatto a qualsiasi altezza tra il massimo ed il minimo consentiti e quindi anche nelle tratte di raccordo altimetrico alla voluta pendenza.

3. IL SISTEMA A 3 KV A CORRENTE CONTINUA IN ITALIA

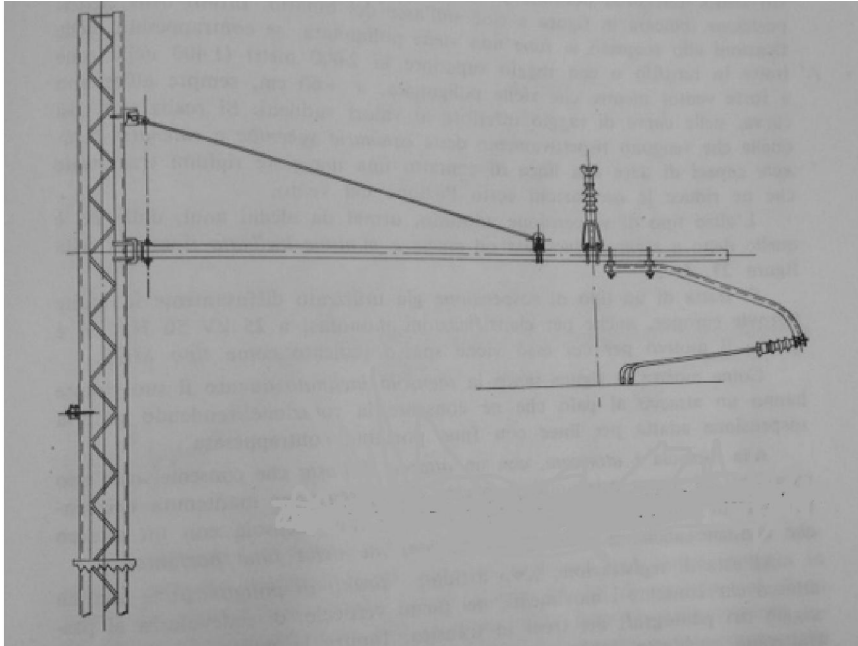


Figura 3.41 Palo, mensola e sospensione per fune contrapposta ed isolatori in vetroresina

dal tipo di mensola e sospensione che si sono descritte, la figura 23.5.2 indica una variante più completa e recente, dove gli attacchi al palo sono snodati tanto per la mensola che per il suo tirante ed è quindi resa adatta per linee di contatto che abbiano anche la fune, oltre che fili di contatto, contrappesata. Il braccio e i tirantini assumono una forma differente rispetto al caso precedente a seguito dell'adozione degli isolatori, gli isolatori sono del tipo VR+PTFE in vetro resina rivestito di teflon.

L'altro tipo di sospensione adottato, ormai da alcuni anni, dalle FS è quello detto a mensola inclinata od anche a puntone inclinato.

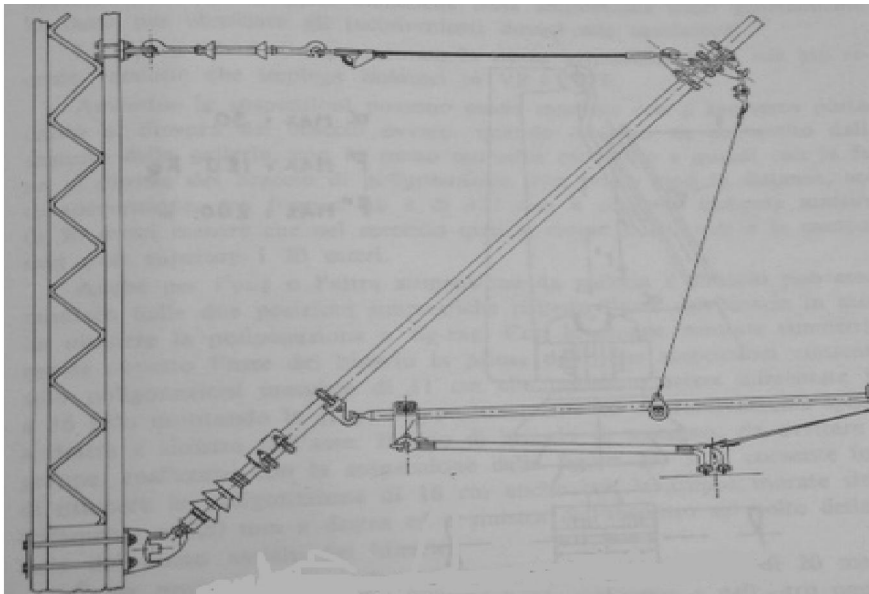


Figura 3.42 Sospensione e mensola inclinata (o tipo MEC)

3. IL SISTEMA A 3 KV A CORRENTE CONTINUA IN ITALIA

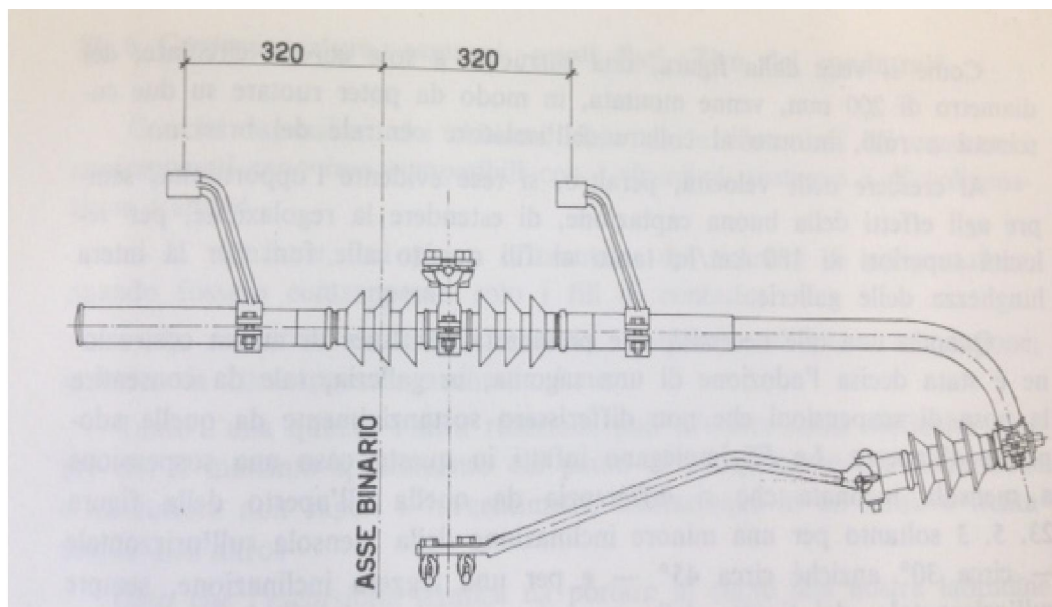


Figura 3.44 Sospensione in galleria con isolatori in vetroresina

Tale figura mostra una versione più recente della sospensione appena citata che impiega isolatori VR+PTFE. Entrambe le sospensioni possono essere montate con il morsetto portacorda al disopra del braccio ovvero, quando ciò non sia consentito dalla sagoma della galleria, con lo stesso morsetto capovolto e quindi con la fune al disotto del braccio di poligonazione. Nel primo caso la distanza, sotto sospensione, tra fune e fili è di 437 mm e consente campate massime di 30 metri mentre nel secondo caso si riduce a 267 mm e la campata non può superare i 20 metri.

Adottando campate di 30 o 20 metri la piena poligonazione viene fatta susseguire in un senso e nell'altro ogni due o tre campate, ovvero si usa una poligonazione ridotta. Sia una che l'altra sospensione sono disegnate, e vanno comunque montate, in modo tale che si realizzi una distanza di almeno 20 cm tra parti in tensione e parti a massa. Si tratta quindi di una distanza superiore a quella di 15 cm giudicata sufficiente all'aperto e ciò è dovuto ad una misura prudenziale per tener conto dell'umidità e dell'atmosfera inquinata facilmente riscontrabili in galleria.

Le sospensioni descritte furono per lungo tempo utilizzate per linee di contatto che non ebbero contrappesatura né per i fili né per le funi portanti, al massimo si contrappesavano i soli fili delle gallerie corte e quelli delle prime campate delle gallerie lunghe. Per questo scopo è stato sufficiente poter roteare i tirantini. Nel momento in cui fu deciso di contrappesare la fune si rese possibile lo scorrimento della fune stessa adottando della figura successiva.

4. Analisi dei modelli utilizzati

4.1 Introduzione

In questo capitolo si rappresentano i modelli utilizzati per le simulazioni, sia statiche che dinamiche, del sistema 3 kV in corrente continua. Dapprima si analizza il modello completo, ovvero considerando le linee in AT, le SSE (comprehensive di trasformatore a tre avvolgimenti, raddrizzatori a dodici impulsi e filtro in uscita) e, ovviamente, la linea di contatto con il binario, dove quest'ultimo rappresenta il circuito di ritorno per la corrente. Oltre a questo si andrà a ricavare i valori dei parametri utilizzati per le simulazioni, in modo da avvicinarsi il più possibile ad un caso reale. Una volta analizzati questo tipo di modelli, si andrà a considerare il modello medio della linea dove si potrà notare che, anche se il modello risulta essere semplificato confronto il precedente, i risultati ottenuti sono in linea con quelli reali.

Una volta eseguite le simulazioni sul sistema a 3 kV in corrente continua e ottenuti dei risultati in linea con quelli reali, si vuole cercare una soluzione per aumentare la potenzialità della linea, costruendo un nuovo modello sulla base di quello attualmente in esercizio.

Le simulazioni eseguite, come detto all'inizio, sono di due tipi: la prima di tipo statico, dove i carichi vengono considerati come concentrati in un punto della tratta e si analizza quindi una situazione istantanea, con particolare attenzione alle cadute di tensione, al ripple della tensione di alimentazione, alle correnti assorbite ed erogate, ecc. La seconda tipologia di simulazione è quella dinamica dove si considera la presenza di uno o più convogli che si spostano lungo la tratta considerata. In questo caso, per semplificare la simulazione si andrà a considerare solo il modello medio. Interessante questa volta sarà l'andamento della tensione al pantografo e delle correnti e potenze erogate dalle SSE.

4.2. Costruzione dei modelli

4.2.1. Linee primarie

Le linee primarie, per tutti i modelli considerati, sono state rappresentate mediante la loro impedenza chilometrica, moltiplicata poi per la lunghezza delle linee stesse, così da ricavare il valore esatto di resistenza e induttanza da applicare. E' stato preso in considerazione una linea a singola terna che presenta le seguenti caratteristiche:

Tabella 4.1 disposizione dei conduttori su una linea primaria

Conduttore	Fase	Altezza dal suolo sul sostegno (m)	Altezza dal suolo a metà campata (m)	Distanza dall'asse di riferimento (m)
1	a	21.3	15	3.75
2	b	23.650	18	-3.2
3	c	26	22	3.05
0	0	29.5	26	0

La lunghezza delle linee primarie è di 15 km e presentano una resistenza chilometrica di 0.2255 Ω /km mentre l'induttanza vale circa 0.05 H/km.

L'alimentazione è supposta a potenza di cortocircuito infinita, in questo modo si può trascurare l'impedenza interna e le linee primarie sono sempre alimentate a 132 kV.

4.2.2. Le sottostazioni elettriche

Una sottostazione elettrica, normalmente, comprende due gruppi raddrizzatori da 5.4 MW ciascuno, alimentati da trasformatori abbassatori da 5750 kVA appartenenti al gruppo Yyd11. Il rapporto di trasformazione è quello tipico delle SSE (132000/2710), con una tensione di cortocircuito del 12% e una potenza di corto pari a 35 kW. Da questi dati si sono poi ricavate le componenti resistive e reattive dell'avvolgimento primario e secondario. Per questo scopo si utilizzano i seguenti simboli:

S = potenza nominale del trasformatore [VA]

V_1 = tensione nominale concatenata del primario [V]

V_2 = tensione nominale concatenata del secondario [V]

I = corrente nominale del trasformatore [A]

E = forza elettromotrice interna stellata [V]

$Z_n = \frac{V_1}{\sqrt{3} \cdot I} = \frac{V_1^2}{S}$ = Impedenza di riferimento [Ω]

R_1, X_1, Z_1 = Resistenza, reattanza e impedenza equivalente del primario [Ω]

R_2, X_2, Z_2 = Resistenza, reattanza e impedenza equivalente del secondario [Ω]

v_1 = Tensione percentuale di cortocircuito da applicare al primario con entrambi i secondari in cortocircuito affinché il trasformatore assorba la corrente nominale.

p_1 = Perdite percentuali misurate applicando v_1

v_2 = Tensione percentuale di cortocircuito da applicare al primario con un solo dei secondari in cortocircuito affinché il trasformatore assorba metà della corrente nominale

p_2 = Perdite percentuali misurate applicando v_2

$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$ = pulsazione del sistema

Applicando prima v_1 e poi v_2 è possibile determinare i valori $R_1, X_1, Z_1, R_2, X_2, Z_2$

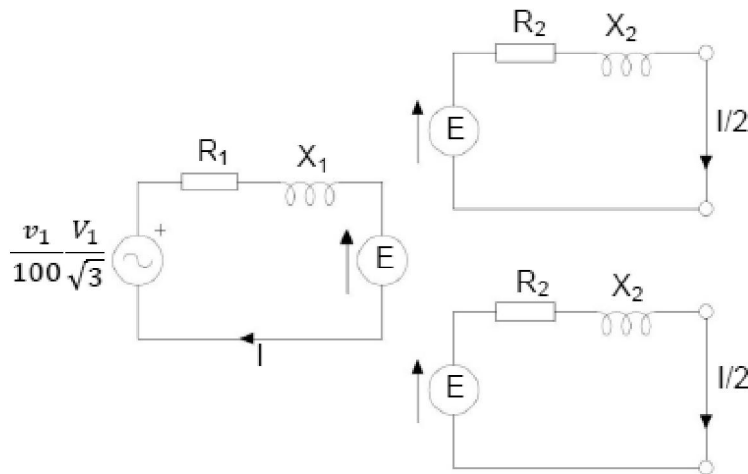


figura 4.1 Prova di cortocircuito n°1 con entrambi i secondari in corto

Applicando v_1 e osservando lo schema equivalente è possibile scrivere

$$\frac{v_1}{100} \cdot \frac{V_1}{\sqrt{3}} = \underline{E} + \underline{I} \cdot (R_1 + jX_1) \quad (4.1)$$

Ma si può notare che

$$\underline{E} = \frac{I}{2} \cdot (R_2 + jX_2) \quad (4.2)$$

Per cui si ottiene

$$\frac{v_1}{100} \cdot \frac{V_1}{\sqrt{3}} = \frac{I}{2} \cdot (R_2 + jX_2) + \underline{I} \cdot (R_1 + jX_1) \quad (4.3)$$

Dato che i termini resistivi R_1, R_2 sono trascurabili rispetto a quelli induttivi X_1, X_2 , si può scrivere, considerando in questo caso il modulo dei vettori.

$$\frac{v_1}{100} \cdot \frac{V_1}{\sqrt{3}} = I \cdot \left(X_1 + \frac{X_2}{2} \right) \quad (4.4)$$

Ovvero

$$X_1 + \frac{X_2}{2} = \frac{v_1}{100} \cdot Z_n \quad (4.5)$$

Applicando la tensione v_2 con le modalità indicate, si può osservare, sempre dallo schema equivalente, che si può ricavare la seguente relazione in modo del tutto analogo

$$X_1 + \frac{X_2}{2} = \frac{v_2}{100} \cdot Z_n \quad (4.6)$$

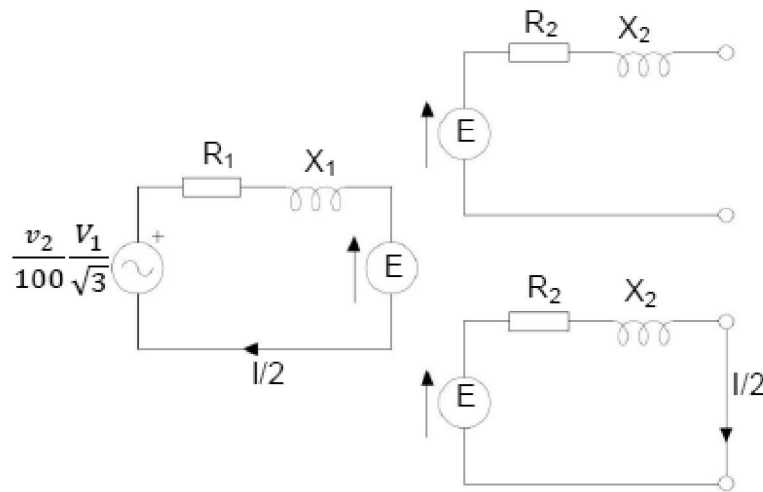


figura 4.2 Prova di cortocircuito n°2, con un solo secondario in corto.

Risolviendo il sistema formato dalle equazioni [4.5] e [4.6] rispetto a X_1 e X_2 , si ottiene

$$X_1 = 2 \cdot Z_n \cdot \left(\frac{v_1 - v_2}{100} \right) \quad (4.7)$$

$$X_2 = 2 \cdot Z_n \cdot \left(\frac{2v_2 - v_1}{100} \right) \quad (4.8)$$

Per quanto riguarda le resistenze equivalenti, si può osservare che, applicando v_1 , le perdite che si verificano all'interno del trasformatore sono pari a

$$\frac{p_1}{100} \cdot \frac{P}{3} = R_1 \cdot I^2 + 2 \cdot R_2 \cdot \frac{I^2}{2} \quad (4.9)$$

Nel caso si applicasse la v_2 le perdite sarebbero le seguenti:

$$\frac{p_2}{100} \cdot \frac{P}{3} = R_1 \cdot \left(\frac{I^2}{2} \right) + R_2 \cdot \left(\frac{I^2}{2} \right) \quad (4.10)$$

Risolviendo anche questo secondo sistema rispetto a R_1 e R_2 si ottiene

$$R_1 = 2 \cdot Z_n \cdot \left(\frac{p_1 - 2p_2}{100} \right) \quad (4.11)$$

$$R_2 = 2 \cdot Z_n \cdot \left(\frac{4p_2 - p_1}{100} \right) \quad (4.12)$$

Per quanto riguarda le reattanze X_1 e X_2 solitamente non vengono forniti i dati alla prova eseguita alla tensione v_2 , ma viene indicato il rapporto di reattanza K , definito come

$$K = \frac{X_1}{X_1 + X_2} \quad (4.13)$$

4. ANALISI DEI MODELLI UTILIZZATI

Sostituendo nell'equazione di K le espressioni di X_1 e X_2 sopra trovate, si ottiene

$$K = \frac{v_1 - v_2}{v_2} = \frac{v_1}{v_2} - 1 \quad (4.14)$$

ottenendo quindi l'espressione di v_2 in funzione di v_1 e K

$$v_2 = \frac{v_1}{1 + K} \quad (4.15)$$

Sostituendo l'espressione appena trovata nelle [4.7] si ottiene

$$X_1 = 2 \cdot Z_n \cdot \frac{v_1}{100} \cdot \frac{K}{1 + K} \quad (4.16)$$

$$X_2 = 2 \cdot Z_n \cdot \frac{v_1}{100} \cdot \frac{1 - K}{1 + K} \quad (4.17)$$

Si possono quindi individuare due casi estremi: il primo in cui $K = 0$, sinonimo del fatto che i due secondari sono del tutto disaccoppiati tra loro. Il trasformatore è caratterizzato dalle seguenti espressioni

$$v_2 = v_1 X_1 = 0 X_2 = 2 \cdot Z_n \cdot \frac{v_1}{100} \quad (4.18)$$

Il secondo caso prevede i due secondari perfettamente accoppiati magneticamente tra di loro, ossia il rapporto di reattanza $K = 1$. Il trasformatore prevede quindi

$$v_2 = \frac{v_1}{2} X_2 = 0 X_1 = Z_n \cdot \frac{v_1}{100} \quad (4.19)$$

Applicando quanto appena visto al trasformatore in SSE, si ottiene

$$p_1 = \frac{p_{cc}}{P} \cdot 100 = \frac{35}{5750} \cdot 100 = 0,609 \% \quad (4.20)$$

p_2 non è invece indicata. Assumendo però che le perdite in condizioni di carico nominale siano equamente suddivise tra il primario ed entrambi i secondari e, nella prova alla tensione v_2 il primario è caricato a metà e uno solo dei secondari è a carico nominale, si può scrivere che

$$p_2 = \frac{1}{4} \cdot \frac{p_1}{2} + \frac{1}{2} \cdot \frac{p_1}{2} = \frac{3}{8} \cdot p_1 = 0,228 \% \quad (4.21)$$

Infine si ottiene

$$Z_n = \frac{v_1^2}{P} = 1,277 \Omega \quad (4.22)$$

Applicando ora la [4.11] e la [4.12] si ottiene

$$R_1 = 2 \cdot Z_n \cdot \left(\frac{p_1 - 2p_2}{100} \right) = 2 \cdot 1,277 \cdot \left(\frac{0,609 - 2 \cdot 0,228}{100} \right) = 0,004 \Omega \quad (4.23)$$

$$R_2 = 2 \cdot Z_n \cdot \left(\frac{4p_2 - p_1}{100} \right) = 2 \cdot 1,277 \cdot \left(\frac{4 \cdot 0,228 - 0,609}{100} \right) = 0,008 \Omega \quad (4.24)$$

Per la valutazione delle induttanze equivalenti bisogna fare una distinzione a seconda del valore del rapporto di reattanza. Nel caso in cui $K = 0$, allora si ottiene

4. ANALISI DEI MODELLI UTILIZZATI

$$v_2 = \frac{v_1}{1+K} = v_1 = 12\% \quad (4.25)$$

$$X_1 = 0 \quad (4.26)$$

$$X_2 = 2 \cdot Z_n \cdot \frac{v_1}{100} = 2 \cdot 1,277 \cdot \frac{12}{100} = 306,46 \Omega \quad (4.27)$$

$$L_2 = \frac{X_2}{\omega} = \frac{306,46}{314,16} \quad (4.28)$$

Nel caso in cui $K = 1$ invece si ricava

$$v_2 = \frac{v_1}{2} = 6\% \quad (4.29)$$

$$X_1 = Z_n \cdot \frac{v_1}{100} = 1,277 \cdot \frac{12}{100} = 153,23 \Omega \quad (4.30)$$

$$L_1 = \frac{X_1}{\omega} = \frac{153,23}{314,16} = 0,488 \Omega \quad (4.31)$$

$$X_2 = 0 \quad (4.32)$$

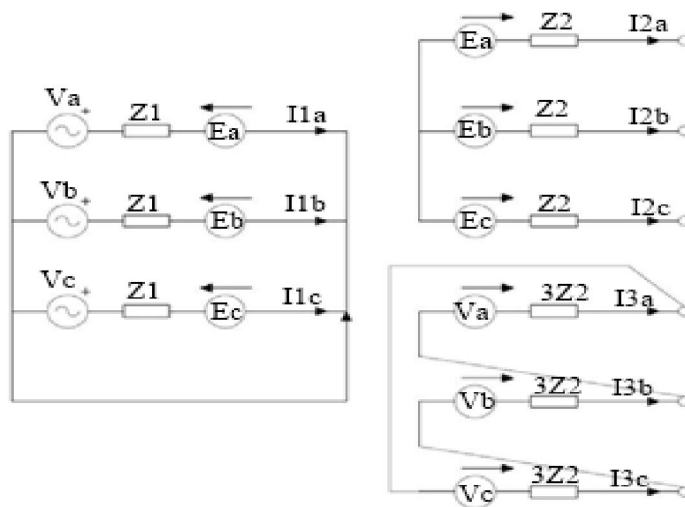


Figura 4.3 Schema equivalente trifase di un trasformatore a due avvolgimenti secondari rispettivamente a stelle e triangolo

Solitamente i trasformatori delle SSE presentano un accoppiamento tra gli avvolgimenti secondari poco importante, per questa ragione si utilizzano i dati ricavati per un rapporto di reattanza nullo. Non bisogna dimenticare che i valori trovati sono relativi ad un circuito equivalente. Quindi il valore della resistenza e della reattanza dell'avvolgimento connesso a triangolo andranno moltiplicati per 3 nel momento in cui bisogna inserire i dati nel modello.

I trasformatori alimentano i ponti raddrizzatori, che presentano delle resistenze in parallelo pari a 2000Ω e una capacità da $0,5\mu\text{F}$ con in serie una resistenza da 10Ω . A valle dei raddrizzatori si trovano i filtri che vengono rappresentati con una capacità di valore pari a $360\mu\text{F}$ e un'induttanza da 6mH . I collegamenti delle SSE alla linea di contatto viene effettuato tramite due corde in rame di lunghezza 300m .

4. ANALISI DEI MODELLI UTILIZZATI

Data la limitata lunghezza di questi conduttori rispetto il resto del circuito, nel modello utilizzato per le simulazioni vengono trascurati. Si trascura anche il collegamento della SSE al binario per lo stesso motivo appena citato.

4.2.3. Linea di contatto

Le SSE alimentano una tratta a doppio o singolo binario (nei casi analizzati si affronta solo il modello a doppio binario), e sono distanziate 15 km una dall'altra. La resistenza chilometrica della linea di contatto può essere ricavata secondo il seguente procedimento:

la sezione dei cavi in rame è pari a 440 mm^2 (questa potrebbe essere aumentata per ridurre la resistenza chilometrica totale e quindi ridurre le cadute di tensione in linea), il coefficiente di usura della catenaria è pari a $K_c = 0,9375$ mentre la resistività del rame è uguale a $\rho_{Cu} = 18 \text{ } \Omega\text{mm}^2/\text{km}$. La resistenza chilometrica è data:

$$r_c = \frac{\rho_{Cu}}{S \cdot K_c} = 0,04364 \frac{\Omega}{\text{km}} \quad (4.33)$$

Una volta calcolato tale parametro sarà possibile ricavare la resistenza della linea moltiplicando per la lunghezza.

4.2.4 Circuito di ritorno

Il circuito di ritorno non è altro che il binario costituito da due rotaie. In questo caso la massa specifica dell'acciaio è pari a $m_{Fe} = 7850 \text{ kg/m}^3$, e la sua resistività è $\rho_{Fe} = 190 \text{ } \Omega\text{mm}^2/\text{km}$, mentre la massa della rotaia per unità di lunghezza vale $m_r = 60 \text{ kg/m}$. Il coefficiente di usura della rotaia è uguale a $K_r = 0,9$.

Ora si può calcolare la sezione delle rotaie, che risulta pari a:

$$S_r = \frac{m_r}{m_{Fe}} = \frac{60}{7850} = 0,0075 \text{ m}^2 = 7500 \text{ mm}^2 \quad (4.34)$$

quindi, la corrispondente resistenza di binario è:

$$r_b = \frac{\rho_{Fe}}{2 \cdot S_r \cdot K_r} = \frac{190}{2 \cdot 7500 \cdot 0,9} = 0,014 \text{ } \Omega/\text{km} \quad (4.35)$$

Nel caso considerato vengono trascurate sia le connessioni induttive che le conduttanze verso terra della rotaia.

La resistenza complessiva "catenaria+binario" risulta essere pari a $0,04364+0,014=0,05764 \text{ } \Omega/\text{km}$.

4.3. Analisi dei blocchi utilizzati per la costruzione dei modelli

Prima di andare ad analizzare il modello completo della tratta considerata per le simulazioni, si rappresentano i singoli blocchi presenti, dove questi vengono poi richiamati anche nel modello a tre

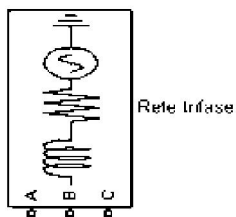


Figura 4.4 Rete di alimentazione trifase

SSE e successivamente modificati per i modelli relativi al sistema 2x3 kV. Il primo blocco considerato è quello relativo all'alimentazione, illustrato in figura 4.4. All'interno di tale blocco si imposta il valore di tensione (in questo caso di 132 kV), i valori di resistenza ed induttanza della rete, la frequenza (50 Hz), e altri parametri. Una volta inseriti gli opportuni valori il blocco è completo.

4. ANALISI DEI MODELLI UTILIZZATI

Il secondo blocco che si prende in esame è quello denominato "SSE", il quale rappresenta il funzionamento di una sottostazione elettrica e viene derivato dalla linea in alta tensione.

Il blocco "SSE" è il seguente:

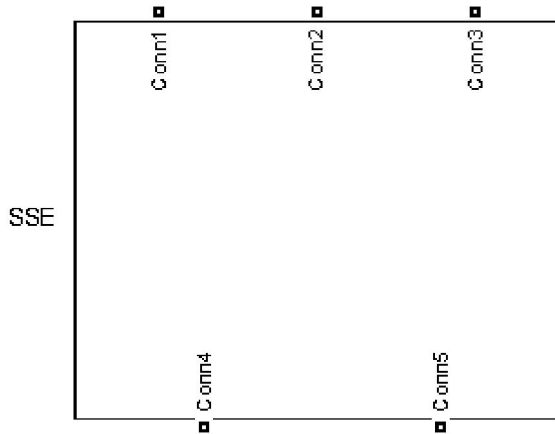


Figura 4.5 Blocco SSE

In ingresso a tale blocco arrivano i tre conduttori dalla rete di alta tensione mentre in uscita, al polo positivo si collega la linea di contatto mentre nel polo negativo il circuito di ritorno ovvero il binario. All'interno del blocco sono contenuti altri due blocchi denominati "gruppo1" e "gruppo2".

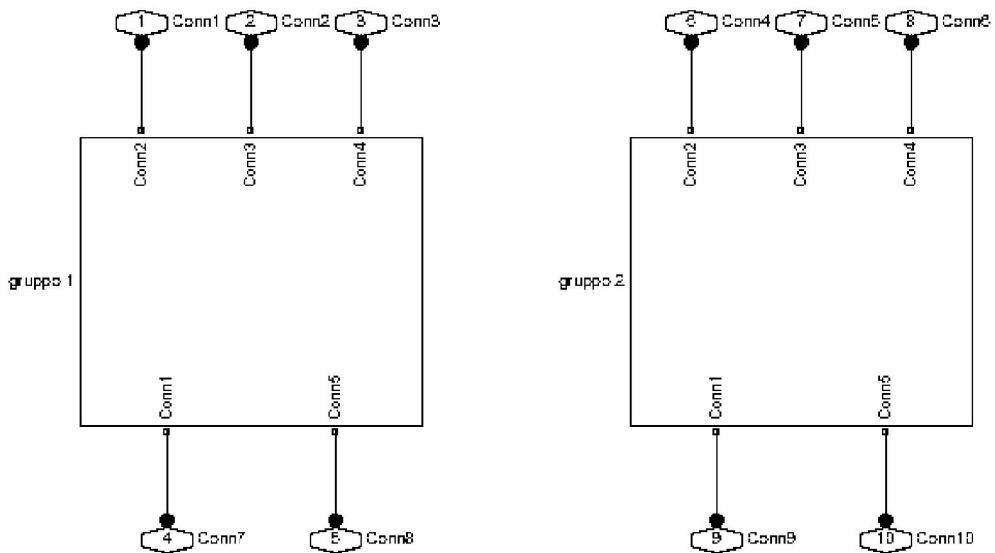


Figura 4.6 Blocchi denominati "gruppo1" e "gruppo2"

Se consideriamo, per esempio, il primo blocco questo è composto dal un trasformatore a tre avvolgimenti con primario a stella e secondari collegati rispettivamente a triangolo e stelle in modo che le tensioni di uscita siano sfasate di 30°. Dopo il trasformatore vengono collegati due raddrizzatori a sei impulsi in parallelo che, grazie al collegamento degli avvolgimenti secondari del trasformatore, rappresentano un unico convertitore a dodici impulsi in modo da ridurre il ripple sulla tensione, infatti si passa da avere come armonica più significativa la dodicesima invece che la sesta.

4. ANALISI DEI MODELLI UTILIZZATI

Dopo il raddrizzatore a dodici impulsi si trova il filtro LC il quale prevede il collegamento di un induttanza in uscita dal polo positivo di valore 6 mH, seguita dal collegamento in derivazione di una capacità di valore pari a 360 μ F. Il blocco "gruppo1" viene rappresentato nella figura seguente.

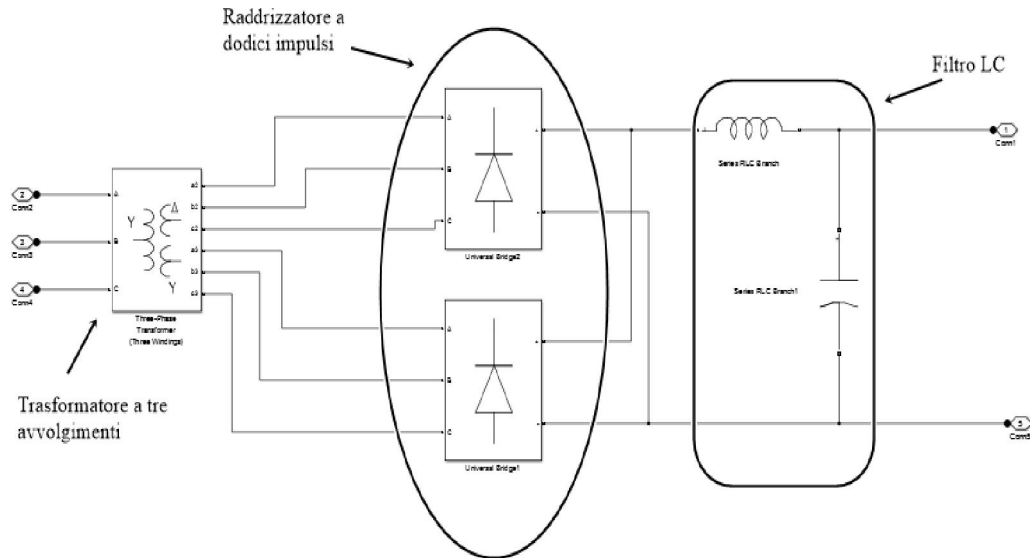


Figura 4.7 Rappresentazione del blocco "gruppo1"

Sia per il trasformatore che per il raddrizzatore bisognerà impostare dei parametri in modo che tutto funzioni correttamente, ovvero, per il trasformatore si indica il valore della resistenza e dell'induttanza sia per il primario che per i secondari impostando una frequenza di 50 Hz mentre per il raddrizzatore si indica i valori per i circuiti di snubber (circuiti di protezione degli switch) e il numero di "gambe" che lo compongono.

Il terzo blocco che si esamina è quello relativo alle linee in alta tensione che collegano le due o tre sottostazioni a seconda del caso che si va a considerare. Esso viene denominato "Linea in AT" e al suo interno si trova l'impedenza dei conduttori valutata per una lunghezza di 15 km. Tale impedenza è composta dalla resistenza longitudinale e dall'induttanza longitudinale della linea. Il tutto viene rappresentato in figura 4.8.

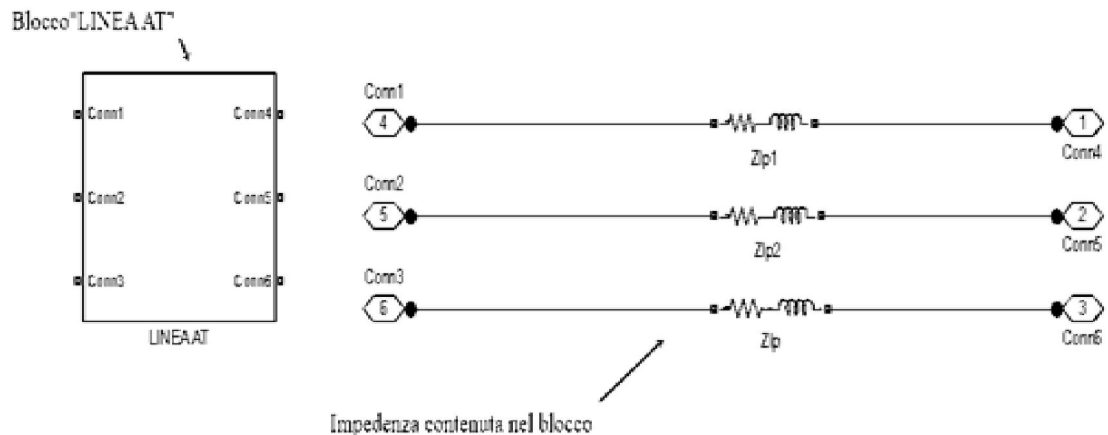


Figura 4.8 rappresentazione del blocco "Linea in AT"

Il prossimo blocco che si va a dimostrare è quello relativo al sistema di misurazione, dove al suo interno si trovano gli strumenti di misura per la valutazione della tensione, corrente e potenza messe in gioco da ciascuna sottostazione. Il blocco, denominato "Sistema di misurazione", è il seguente:

4. ANALISI DEI MODELLI UTILIZZATI

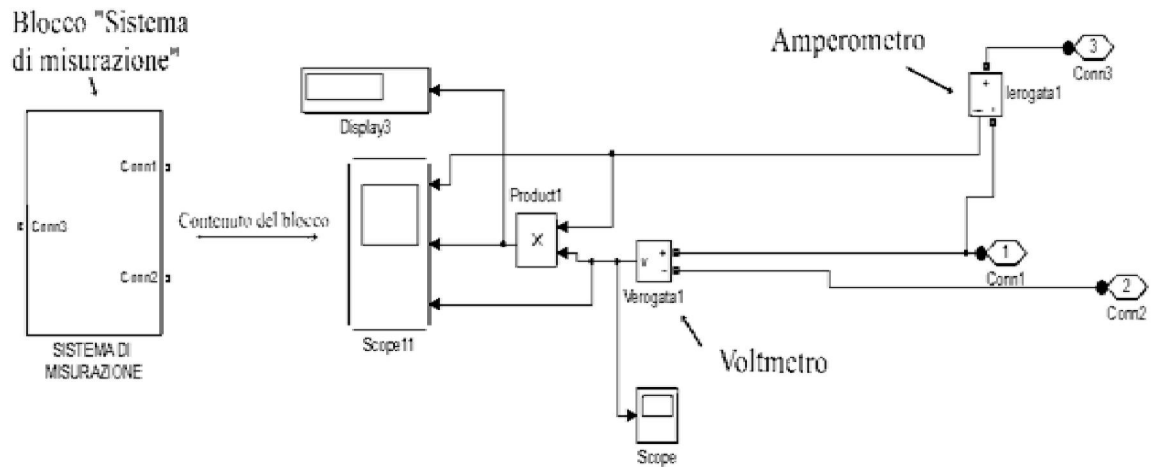


Figura 4.9 Rappresentazione del blocco "Sistema di misurazione"

Dalla figura si può vedere come la potenza sia ottenuta attraverso l'operatore "product" che esegue la moltiplicazione tra la tensione in uscita e la corrente in uscita dalla sottostazione.

L'ultimo blocco considerato per i modelli più completi è quello denominato "Binario". Di questi blocchi se ne trovano due in quanto si è considerato una tratta a doppio binario e al suo interno si trovano le resistenze della linea di contatto e del binario, che vengono calcolate come spiegato nei paragrafi 4.2.3 e 4.2.4, oltre alle resistenze, all'interno del blocco si trovano i carichi o il carico a seconda del caso che si va a considerare, che sono rappresentati tramite una resistenza di valore variabile a seconda del caso considerato. Di seguito viene riportato il blocco "Binario1".

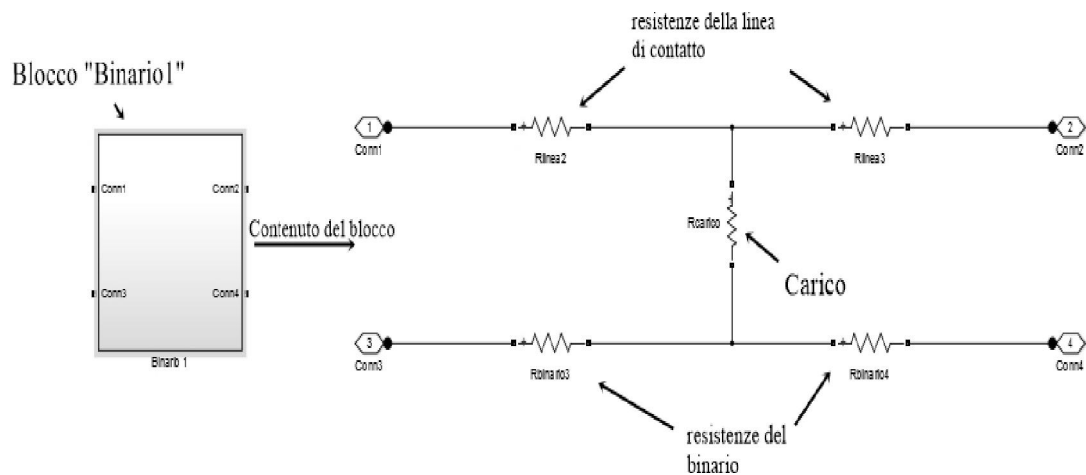


Figura 4.10 Rappresentazione del blocco "Binario1"

Una volta illustrati tutti i blocchi utilizzati per le simulazioni statiche si è passati alla costruzione dei modelli utilizzati per le simulazioni della tratta considerata

4.3.1 Modello a due SSE di una tratta a doppio binario

Con l'utilizzo di blocchi appena introdotti è possibile realizzare il modello a due sottostazioni impiegato nelle simulazioni statiche.

Lo schema del modello a due SSE è il seguente:

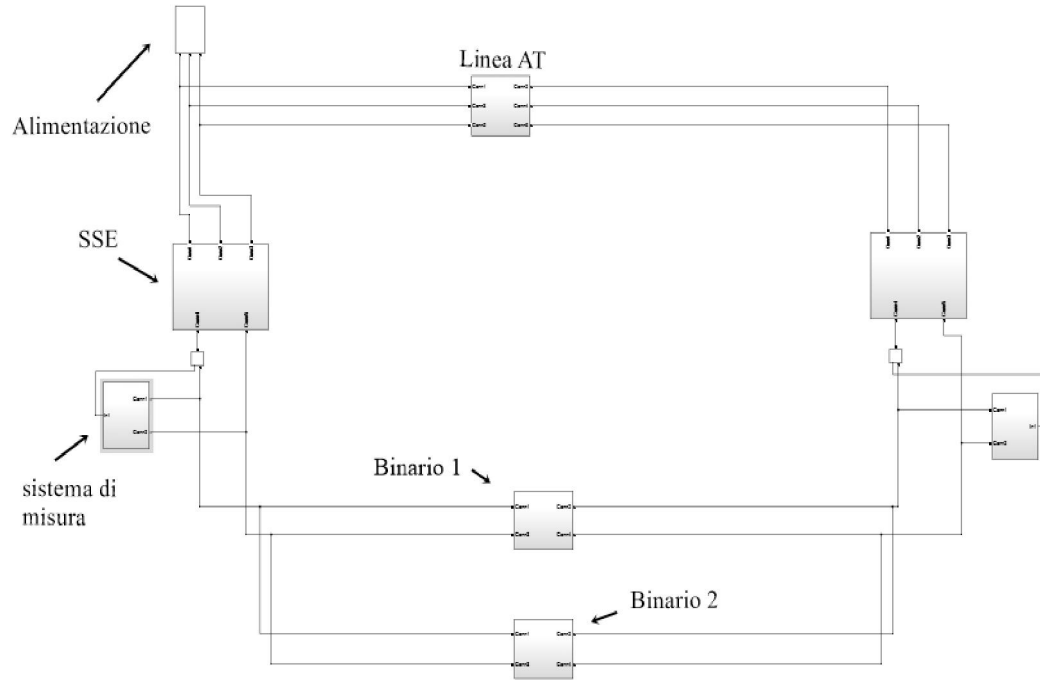


Figura 4.11 Modello a due SSE con singola alimentazione in AT per le simulazioni statiche

Una volta effettuate le simulazioni statiche con il modello completo è possibile utilizzare un modello medio il quale prevede l'eliminazione della parte in alta tensione e le sottostazioni vengono rappresentate da generatori di tensione continua e costante in serie con un'impedenza composta da una resistenza R (dovuta ai diodi) e da una reattanza X_S che tiene conto della reattanza di dispersione del trasformatore più quella della rete in alta tensione. Questo porta ad una modifica del blocco "SSE" che per il modello medio è mostrato in figura 4.12.

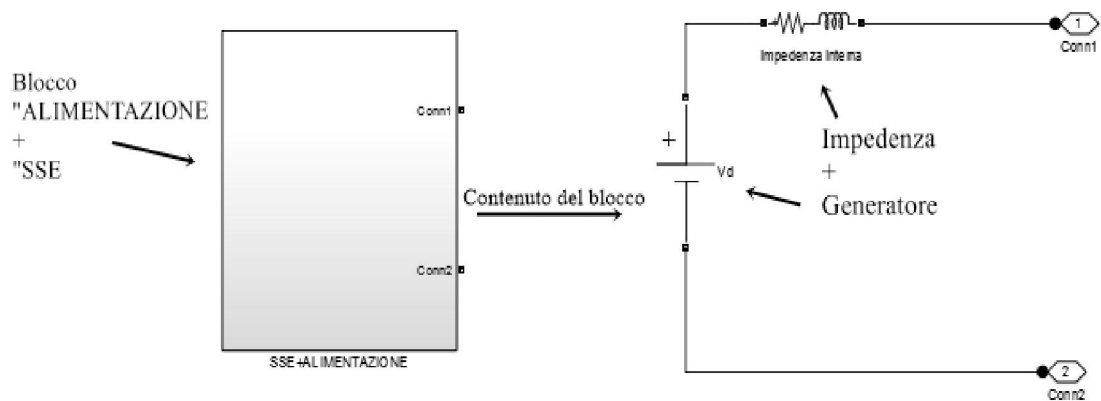


Figura 4.12 Rappresentazione del blocco "Alimentazione+SSE"

4. ANALISI DEI MODELLI UTILIZZATI

Il blocco relativo all'alimentazione dei convogli rimane uguale a quello utilizzato per lo schema precedente. Quindi il modello medio è il seguente:

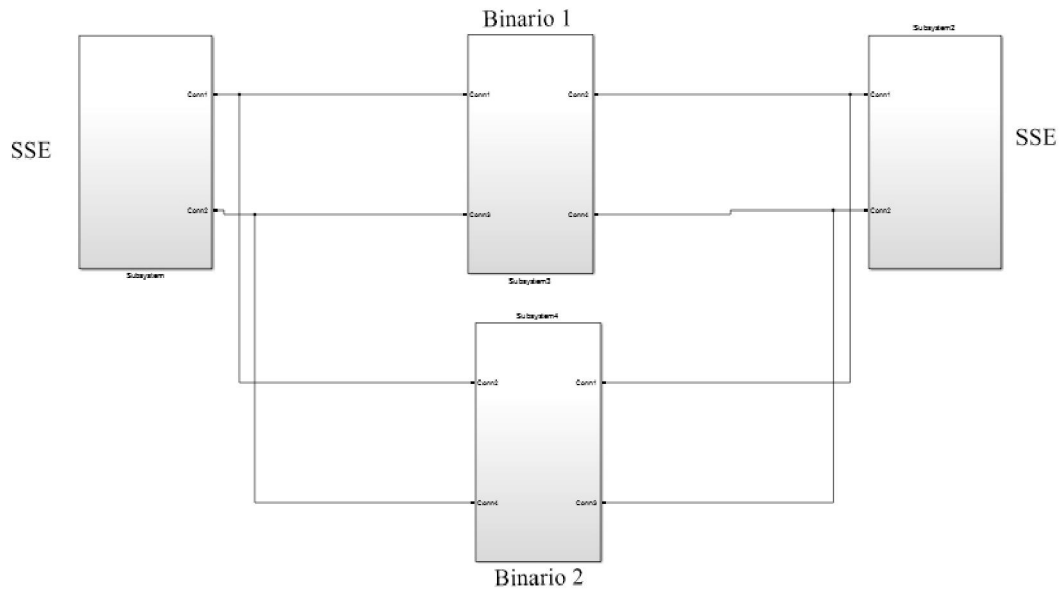


Figura 4.13 Modello medio a due SSE per le simulazioni statiche

Uno schema di questo tipo soddisfa in pieno le esigenze richieste, infatti si ottengono risultati molto simili a quelli del caso precedente però con tempi di simulazione ridotti. Di contro però non si ottiene il ripple sulla tensione in uscita dalle SSE e quindi sulla tensione della linea di contatto.

4.3.2. Modello a tre SSE di una tratta a doppio binario

Per la realizzazione di questo modello si è fatto sempre riferimento ai blocchi introdotti all'inizio del paragrafo 4.3. Lo schema ottenuto per il modello a tre SSE è il seguente:

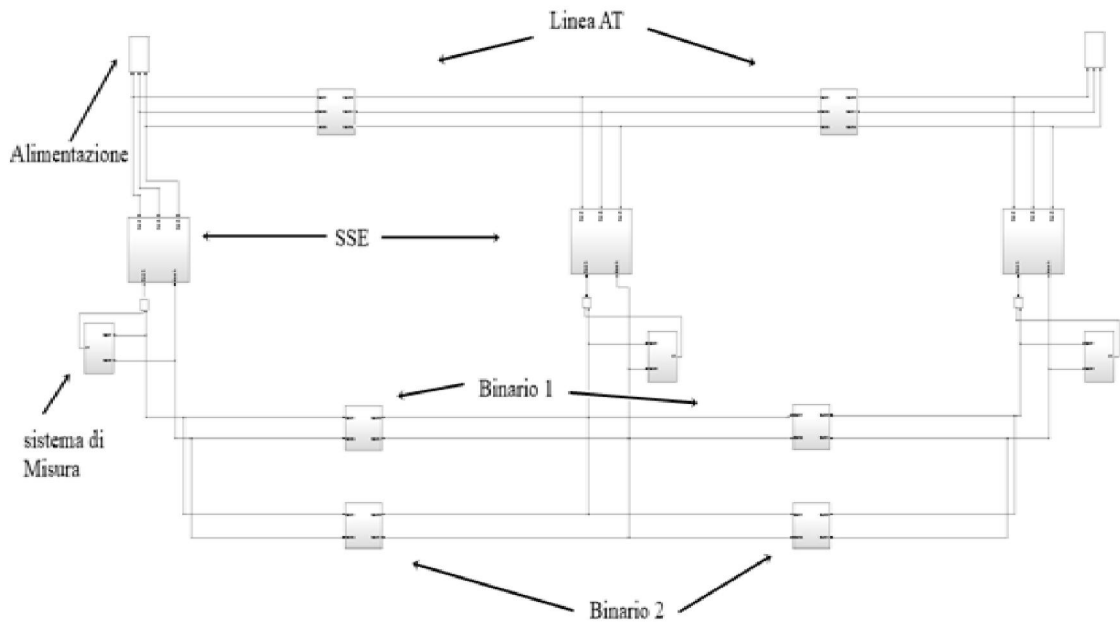


Figura 4.14 Modello a tre SSE con doppia alimentazione in AT utilizzato nelle simulazioni statiche

Come per il caso precedente, una volta effettuate le simulazioni e ottenuti i risultati, che sono in linea con quelli reali, si è considerato un modello medio del circuito appena visto. Per la realizzazione di tale modello viene utilizzato il blocco "Alimentazione + SSE" utilizzato anche per il caso precedente. Il modello medio di una tratta a tre SSE è il seguente:

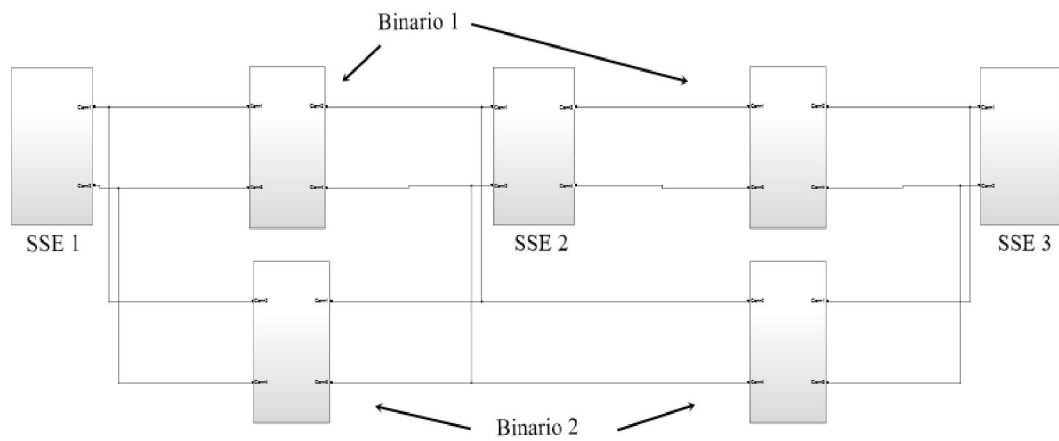


Figura 4.15 Modello medio a tre SSE per le simulazioni statiche.

4.4. Modelli utilizzati per le simulazioni Dinamiche

Per le simulazioni dinamiche si è preso come riferimento il modello medio con la differenza che per i convogli viene considerato un assorbimento costante di corrente per tutta la lunghezza della tratta considerata e con tensione, potenza assorbita variabili a seconda del punto in cui si trova il treno stesso.

In figura 4.16 è riportato un modello medio utilizzato nelle simulazioni dinamiche.

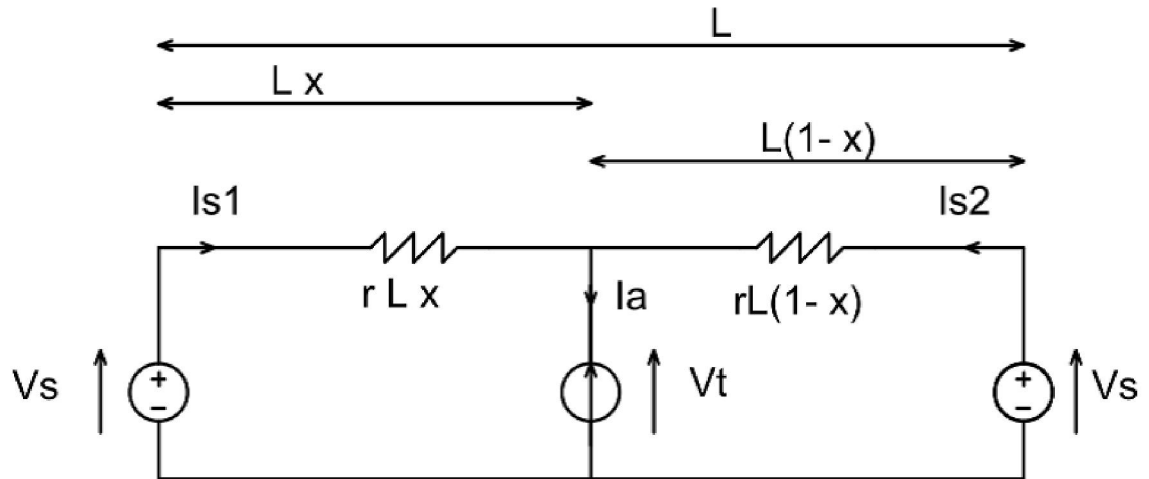


Figura 4.16 Modello medio utilizzato per le simulazioni dinamiche.

La tratta considerata avrà una lunghezza di 15 km e comprende due SSE. Esse vengono supposte a tensione costante con potenza e corrente variabili a seconda della posizione del convoglio. In questo modo si riesce, al variare della distanza x , a tracciare l'andamento della caduta di tensione in linea, della potenza assorbita dal convoglio, delle correnti e potenze erogate dalle SSE. I casi che andremo a prendere in considerazione sono 3:

- Caso due SSE a singolo binario con $E_a = E_b = E$
- Caso due SSE a singolo binario con $E_a \neq E_b$
- Caso due SSE a doppio binario con $E_a = E_b = E$

Le principali formule utilizzate sono le seguenti:

1. Caduta di tensione nel primo caso

$$\Delta V = r \cdot I \cdot x(i) \cdot \frac{L - x(i)}{L}; \quad (4.36)$$

2. Caduta di tensione nel secondo caso

$$\Delta V = r \cdot I \cdot x(i) \cdot \frac{L - x(i)}{L} + r \cdot x(i) \cdot I_c; \quad (4.37)$$

3. Caduta di tensione nel terzo caso

$$\Delta V = r \cdot I \cdot x(i) \cdot \frac{\frac{2}{3}L - x(i)}{\frac{2}{3}L}; \quad (4.38)$$

4. Formule comuni per tutti i casi

$$V_{linea} = E - \Delta V; \quad (4.39)$$

$$I_a = \frac{L - x(i)}{L} I; \quad (4.40)$$

$$P_{ass} = V_{linea} \cdot I; \quad (4.41)$$

$$P_{erogata} = E \cdot I; \quad (4.42)$$

Le analisi effettuate con questi modelli (eccetto quelli dinamici che sono state affrontate in un modo leggermente diverso) sono state effettuate anche in un altro elaborato che utilizzava il software EMPT-RV, così da poter confrontare i risultati ottenuti nelle simulazioni.

5. Simulazioni di una tratta ferroviaria a 3Kv in corrente continua

I modelli sviluppati hanno permesso di eseguire due tipi di simulazione: statiche e dinamiche. In primo luogo sono state eseguite le simulazioni statiche che hanno tempi di simulazione molto minori, e successivamente, quelle dinamiche.

Le simulazioni statiche hanno lo scopo di far vedere l'andamento delle forme d'onda della tensione e corrente in diversi punti dell'impianto, nel momento in cui un carico si trovi al centro della tratta analizzata, ovvero nel caso peggiore. I modelli utilizzati sono stati due: il primo prevede la presenza di due sole sottostazioni, per una lunghezza totale della tratta analizzata pari a 15km sia a singolo che doppio binario, con alimentazione di una sola da parte della rete di trasmissione, il secondo è invece più completo, e comprende tre sottostazioni, per una lunghezza totale della tratta pari a 30km sia a singolo che doppio binario, con doppia alimentazione da parte della rete. Per il primo modello (caso A) è stato un preso in considerazione un solo carico al centro della tratta interessa, rappresentato da una resistenza di valore 1Ω denominata R1. Nelle simulazioni a doppio binario il carico si trova sul primo binario. Nel modello più complesso (caso B), i carichi sono tre: 2 nella parte di sinistra, denominati rispettivamente R1 e R3 e rispettivamente di valore pari a 1 e 2Ω , mentre solo un carico nella parte destra rappresentato sempre da una resistenza con valore di 1Ω . Il valore di resistenza di 1Ω è stato scelto in modo tale da simulare l'assorbimento di potenza di un convoglio utilizzato nel sistema Alta Velocità/Alta Capacità (circa 9MW), mentre quello da 2Ω per simulare la presenza di un treno a metà tratta che assorbe una potenza pari a 4.5 MW.

Prima di eseguire le simulazioni si sono impostati i parametri di simulazione, e particolar modo il tempo di simulazione e il passo di integrazione. Per il caso più semplice (2 SSE) si è impostato un tempo di simulazione pari a 600ms affinché il sistema raggiunga le condizioni di regime, mentre per il caso più complesso è necessario 1s. Le forme d'onda prese in considerazione nei due modelli utilizzati per le simulazioni statiche sono:

- Le tensioni di alimentazione delle SSE (Valim)
- Le tensioni in uscita dalle SSE della linea di contatto (Verogata)
- Le tensioni assorbite dai carichi (Vcarico)
- Le correnti erogate dalle SSE (Ierogata)

Passiamo ora a visualizzare i risultati ottenuti dalle simulazioni statiche.

5.1 Le simulazioni statiche

5.1.1 caso A (due SSE)

Per quanto riguarda il modello a due SSE, le forme d'onda della tensioni di alimentazione sono riportate nella figura seguente.

5. SIMULAZIONI DI UNA TRATTA FERROVIARIA A 3 KV IN CORRENTE CONTINUA

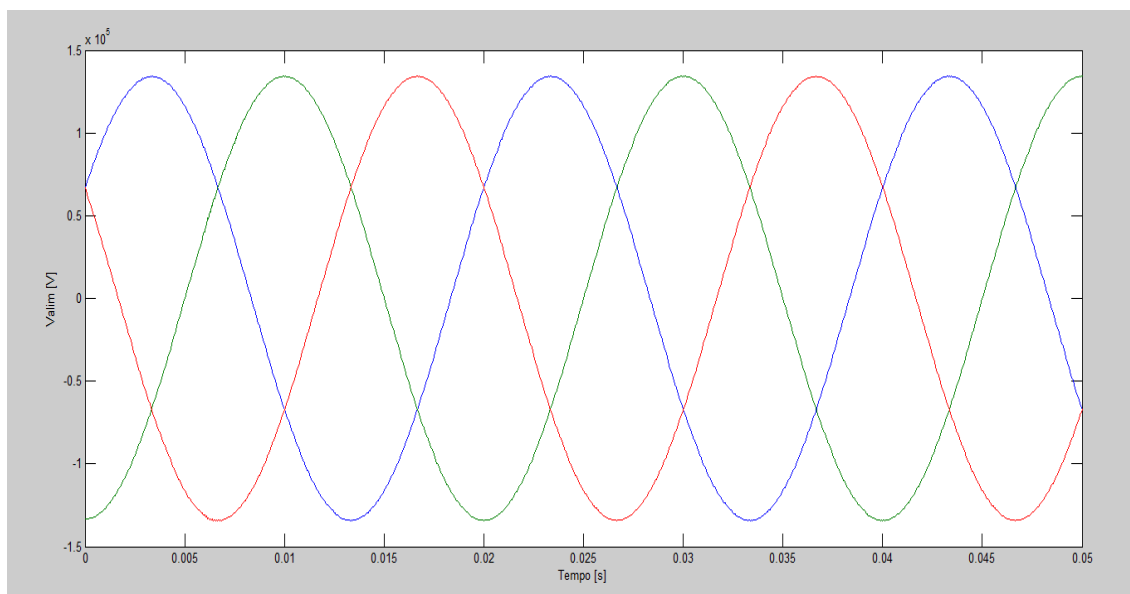


Figura 5.1 Tensione di alimentazione delle SSE

Come si può vedere, la forma d'onda nelle tre fasi non è perfettamente liscia, ma presenta un minimo contenuto armonico dovuto alla presenza dei raddrizzatori dodecafase installati nelle sottostazioni, che mettono in gioco, nel lato alternata, correnti (e quindi corrispondenti tensioni) armoniche di ordine pari a $12k \pm 1$. I valori delle tensioni di alimentazione delle due sottostazioni sono molto simili, questo significa che la caduta di tensione della linea primaria che collega le due SSE è poco importante.

Le tensioni in uscita dalle SSE hanno invece il seguente andamento:

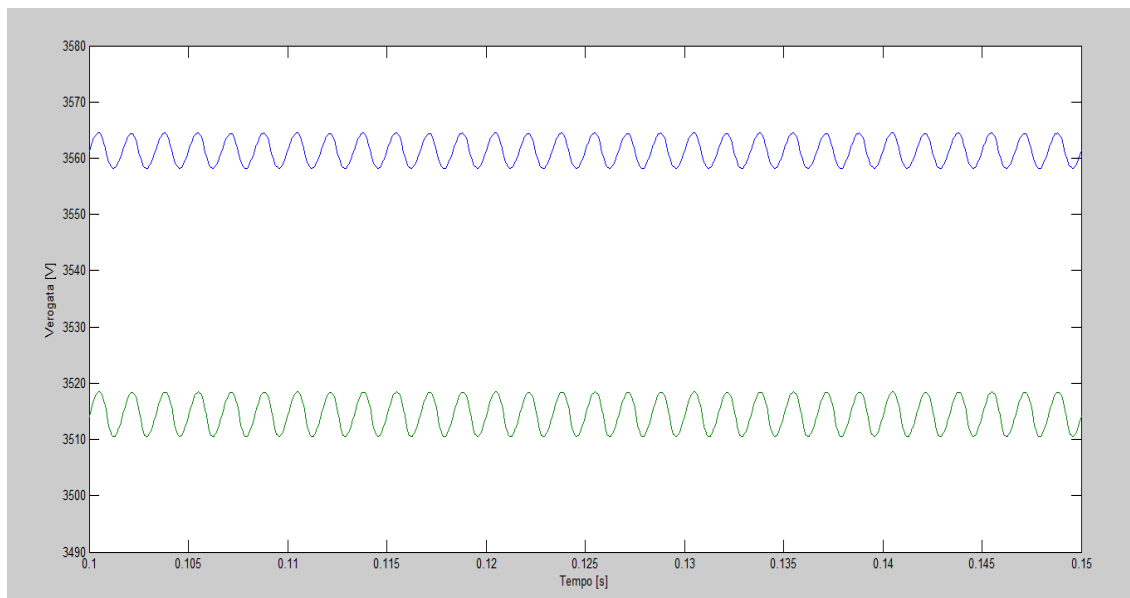


Figura 5.2 Tensioni erogate dalle SSE

Dalla forma d'onda si può notare un tipico ripple causato da un ponte raddrizzatore a 12 impulsi dove avremo armoniche di tensione con un ordine pari $12k$. Questo significa che l'armonica più considerevole sarà la dodicesima. Il valore della tensione in uscita dalla SSE di sinistra è di circa 3562 V (Linea Blu), mentre quello della SSE di destra è uguale a 3518 V (Linea Verde). La piccola differenza che avremo fra le due SSE è dovuta alla caduta di tensione sulla linea primaria

5. SIMULAZIONI DI UNA TRATTA FERROVIARIA A 3 KV IN CORRENTE CONTINUA

La tensione assorbita dal carico è la seguente:

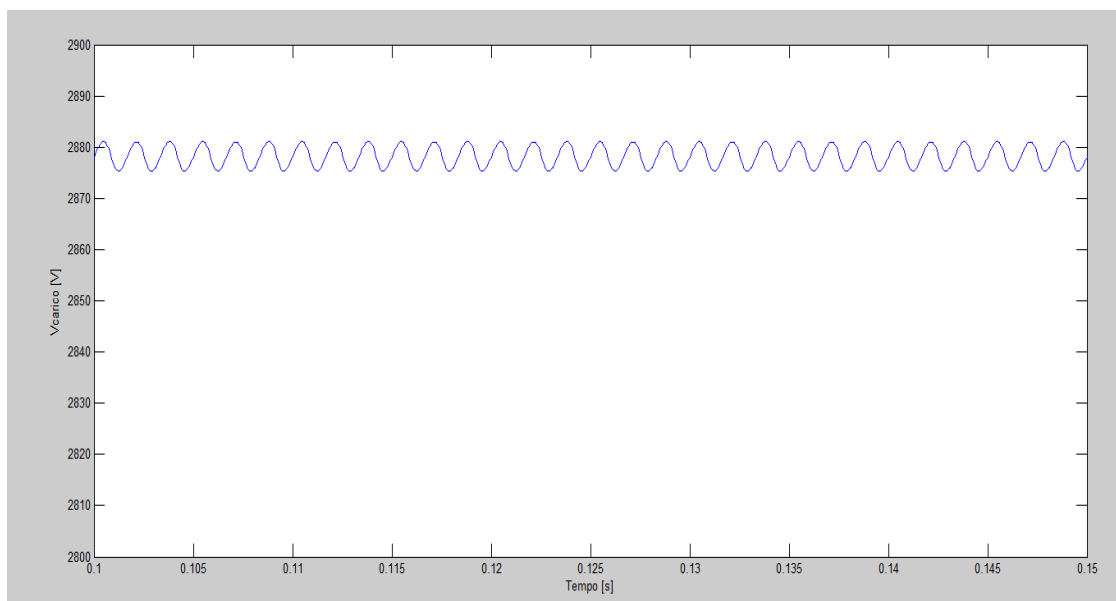


Figura 5.3 Andamento della tensione sul carico

Anche in questo caso si nota il tipo ripple di tensione causato da un raddrizzatore dodecafase già visto per le forme d'onda della tensione in uscita dalle SSE. Il valore della tensione si assesta intorno ai 2880V, ancora accettabile dal punto di vista dell'alimentazione ferroviaria. La caduta di tensione è pari circa a 650V rispetto all'alimentazione da parte delle SSE, dovuta ad una corrente erogata pari a 1485A. La potenza effettivamente assorbita dal carico è pari a 8.26MW, in linea con le potenze assorbite dai convogli che viaggiano ad una velocità pari a 300 km/h. Al fine di aumentare la potenzialità della linea, la caduta di tensione registrata risulta già troppo elevata, non permettendo di raggiungere gli standard tipici del sistema Alta Velocità/Alta Capacità (treni intervallati di 5 minuti con velocità di 300km/h). Inoltre nel caso che stiamo analizzando non abbiamo tenuto conto del problema di captazione della corrente, che per potenze molto elevate risulta essere prioritario. Per questi motivi il sistema di alimentazione in corrente continua sembra aver già raggiunto il massimo delle sue possibilità, rendendo necessario un suo miglioramento.

Le correnti erogate dalle SSE si presentano nel seguente modo:

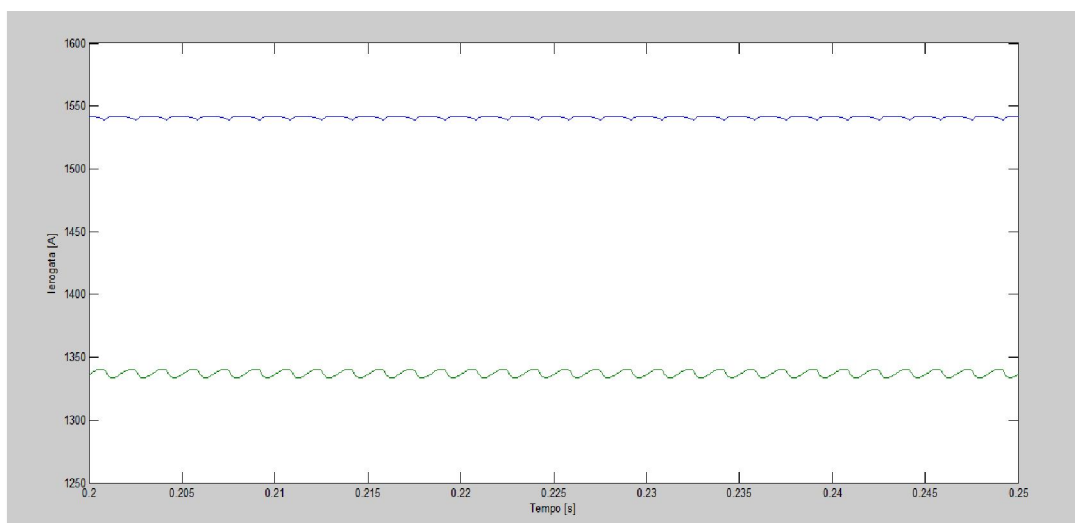


Figura 5.4 Correnti erogate dalle SSE

5. SIMULAZIONI DI UNA TRATTA FERROVIARIA A 3 KV IN CORRENTE CONTINUA

Anche le correnti presentano un ripple simile a quello delle tensioni.

La differenza nei valori delle due correnti è dovuto a un leggero squilibrio nelle tensioni di alimentazione della linea di contatto.

La corrente più alta è erogata, come è lecito pensare, dalla sottostazione che si trova alla tensione più alta, ovvero quella di sinistra (Linea Blu). Lo squilibrio genera inoltre delle correnti di ricircolo nella linea non caricata. Tale corrente genera ulteriori perdite che possono essere facilmente evitate se le sottostazioni erogassero la stessa tensione di alimentazione utilizzando il dispositivo di variazione sottocarico che effettua una variazione fine della tensione ai secondari dei trasformatori presenti nelle sottostazioni. Il modello utilizzato nelle simulazioni non prevede la presenza di tale dispositivo e quindi sarà presente una corrente di ricircolo nella linea non caricata.

L'andamento di tale corrente è riportato nella figura seguente.

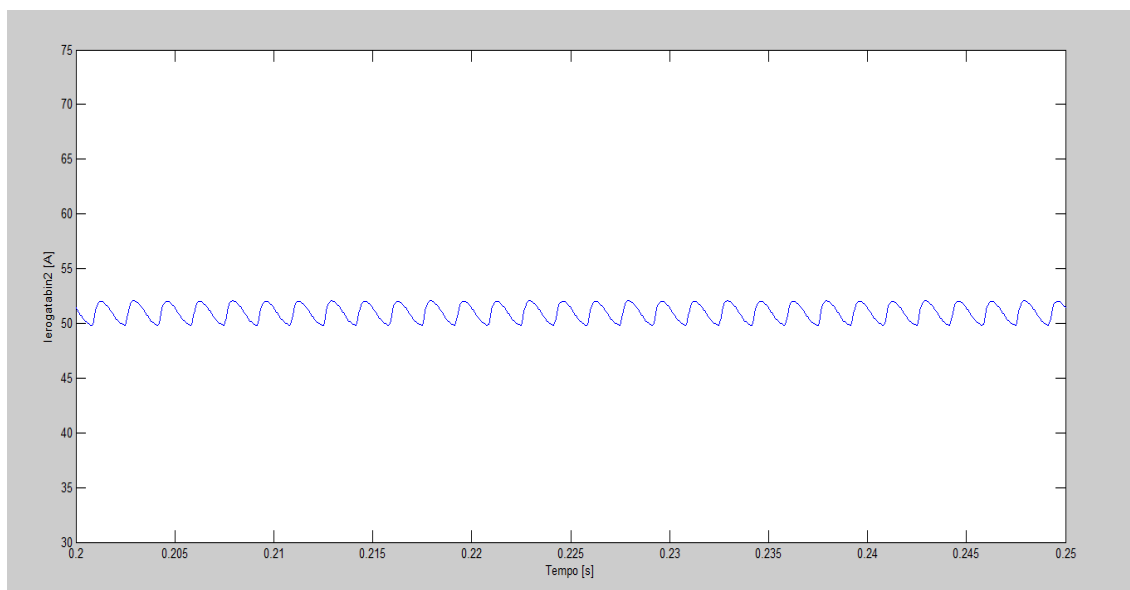


Figura 5.5 Corrente erogata da una SSE sulla linea non caricata

Il suo valore è abbastanza contenuto nei confronti delle correnti assorbite dai carichi, determinando una potenza persa non molto elevata. Solo se lo squilibrio risulta essere eccessivo allora le potenze messe in gioco dalle correnti di ricircolo assumeranno un ruolo significativo.

Dato che i due binari non sono isolati tra loro, le correnti si distribuiscono tra di essi, come si vede dai grafici seguenti.

5. SIMULAZIONI DI UNA TRATTA FERROVIARIA A 3 KV IN CORRENTE CONTINUA

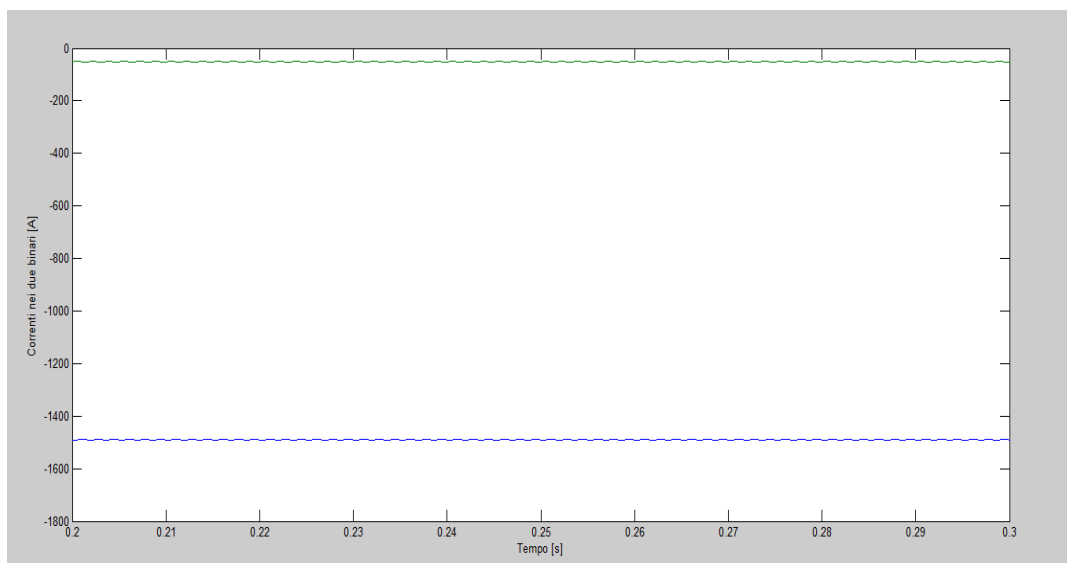


Figura 5.6 Andamento delle correnti sui binari

Il segno negativo delle correnti indica che la corrente è entrante nella SSE, mentre il segno positivo, come detto sopra, indica che la corrente è erogata dalla SSE.

Il binario non caricato partecipa alla conduzione della corrente di ritorno, presentando un valore di corrente in prossimità della SSE pari a circa 51A.

Note le tensioni e le correnti erogate dalle SSE e assorbite dal carico, è possibile valutare il rendimento del sistema di alimentazione dei convogli. Le potenze erogate dalle SSE sono a pari 5.491MW per quella di sinistra, mentre 4.7MW per la SSE di destra, per una potenza totale pari a 10.191MW. La potenza assorbita dal carico invece è pari a 8.283MW. Il rendimento del sistema è pari a 0.813.

5.1.2 caso B(Tre SSE)

Lo stesso tipo di analisi è stata eseguita anche per il caso più complesso (tre SSE), mostrando, come è logico pensare, molte analogie.

Le tensioni di alimentazione delle SSE presentano l'andamento riportato nella figura sottostante.

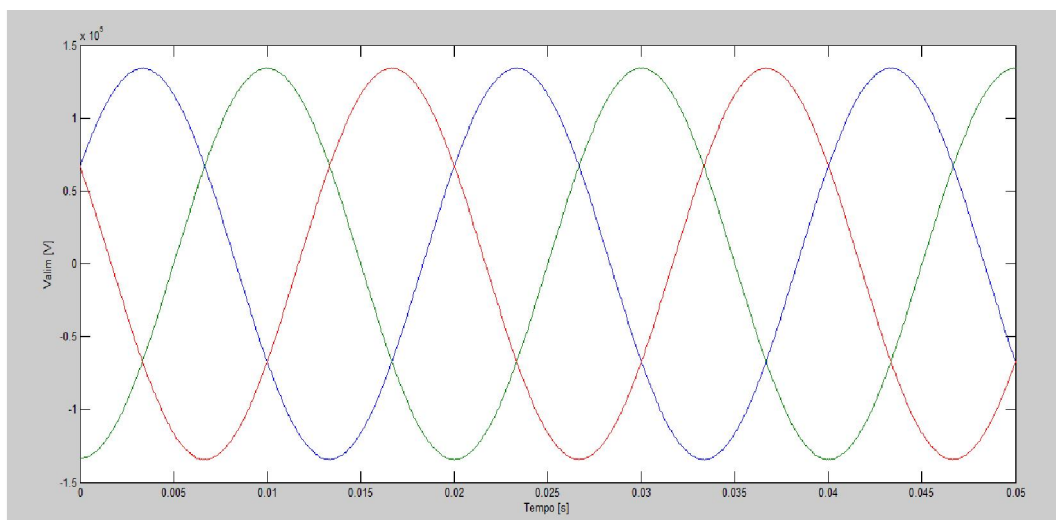


Figura 5.7 Tensioni di alimentazione

5. SIMULAZIONI DI UNA TRATTA FERROVIARIA A 3 KV IN CORRENTE CONTINUA

Gli andamenti e il ripple è lo stesso del caso precedente quindi non andremo a ribadirla. Le tensioni a cui sono sottoposti i carichi si presentano nella seguente maniera:

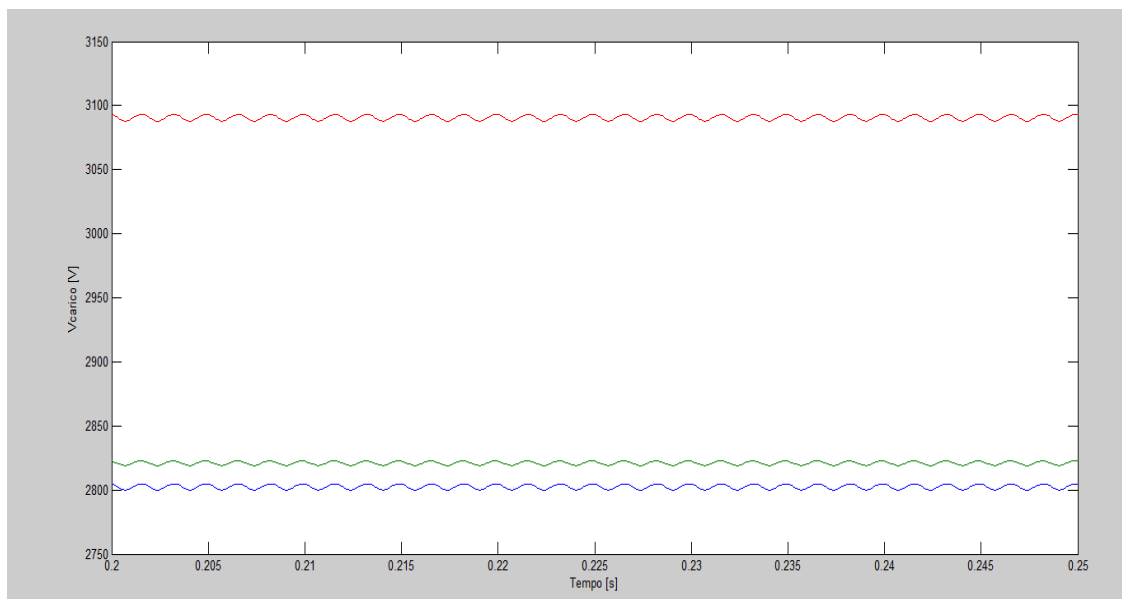


Figura 5.8 Andamento delle tensione sui carichi

Dal grafico possiamo vedere, in blu e rosa, le forme d'onda relative ai carichi con valore di resistenza pari a 1Ω (quelli più gravosi per la linea). Anche in questo i valori delle tensioni risultano essere abbastanza contenuti, si assestano fra 2800 e 2830 V. Anche se in questo modello l'alimentazione delle due SSE da parte delle linee primarie è più simmetrica, si nota comunque una piccola differenza tra i valori delle tensioni erogate ai carichi, dovuta al maggior carico a cui è sottoposta la parte sinistra della linea, che presenta due convogli sui binari alimentati dalla SSE. Le reali potenze assorbite dai carichi risultano in definitiva essere pari rispettivamente a 7.843 MW per il treno di destra e 7.95 MW per quello di sinistra. La forma d'onda rosa è relativa al carico da 2Ω che, assorbendo una corrente minore, influisce in modo meno rilevante sulle cadute di linea, presentando una tensione pari a 3088V. Il carico infatti assorbe una potenza di 4.769 MW, di molto inferiore rispetto a quelle assorbite dagli altri due convogli.

Prendendo in considerazione la tensione che interessa un carico da 1Ω , si può vedere che presenta armoniche di tensione aventi un ordine pari a 12k, ovvero l'armonica più significativa sarà la dodicesima (si trova a 600 Hz) seguito poi da tutte le armoniche multiple di dodici. Tale contenuto armonico è tipico dei raddrizzatori a 12 impulsi. Inoltre si potrebbe trovare anche una seconda armonica dovuta alla non perfetta simmetria del circuito di raddrizzatore.

Le tensioni erogate dalle SSE si presentano invece nel modo seguente:

5. SIMULAZIONI DI UNA TRATTA FERROVIARIA A 3 KV IN CORRENTE CONTINUA

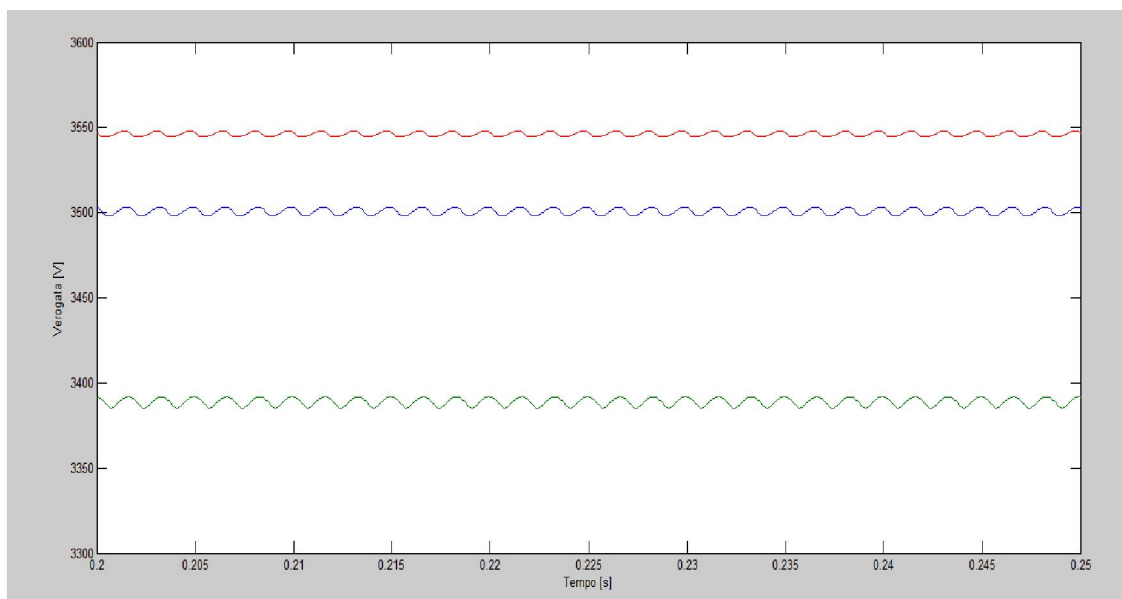


Figura 5.9 Tensioni erogate dalle SSE

Rispetto al modello con due SSE il contenuto armonico è un po' superiore. Il valore della tensione erogata dalla sottostazione centrale, pari a 3386 V (Linea Verde), risulta più bassa rispetto alle tensioni erogate dalle SSE laterali, che valgono rispettivamente 3499 V per quella di sinistra (Linea Blu) e 3546 V per quella di destra (Linea Rosa), essendo alimentate in modo indiretto e dovendo alimentare tutti e tre i carichi. La SSE di destra presenta invece la tensione di alimentazione della linea di contatto più elevata in quanto le linee che convergono in essa sono le meno caricate. Questi squilibri di tensione determinano, come visto per il modello precedente, delle correnti di ricircolo, che interessano tutte le linee ferroviarie alimentate, determinando ulteriori perdite in linea.

Se consideriamo, per esempio, la forma d'onda della tensione di alimentazione della linea di contatto messa in gioco dalla SSE di sinistra si trova che la componente continua è ancora l'armonica predominante e le altre possono essere trascurate dato che presentano un'ampiezza molto inferiore. Il contenuto armonico totale della forma d'onda è sempre quello relativo ad un convertitore a 12 impulsi ovvero 12k.

Le correnti erogate dalle SSE si presentano invece nella seguente maniera:

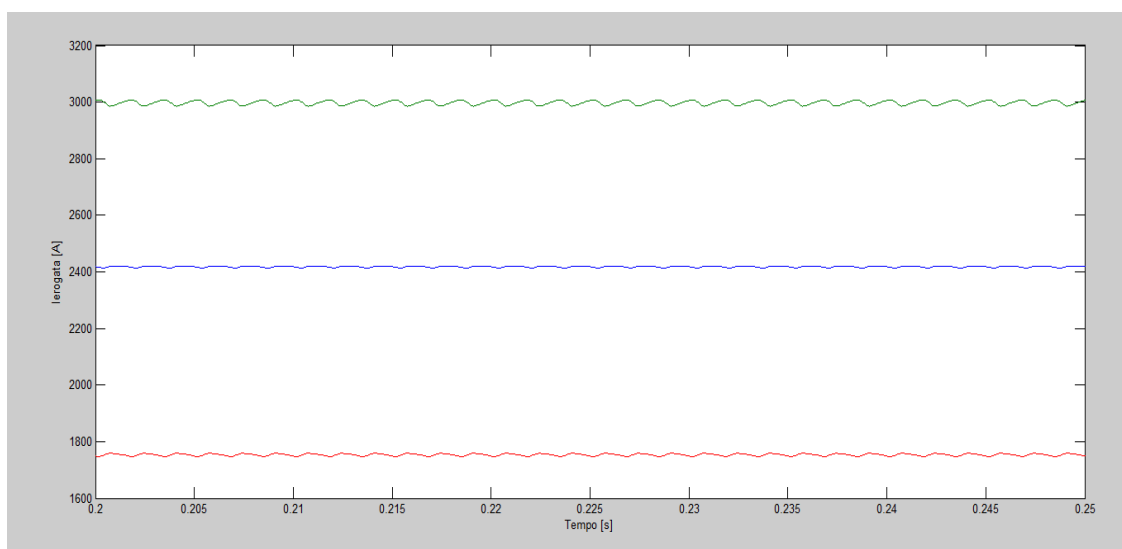


Figura 5.10 Andamento delle correnti erogate dalle SSE

5. SIMULAZIONI DI UNA TRATTA
FERROVIARIA A 3 KV IN CORRENTE CONTINUA

La corrente erogata dalla SSE centrale è quella più elevata ed assume un valore pari a 2987 A (Linea Verde). Questo accade perché la SSE deve alimentare sia la parte di linea alla sua sinistra e sia quella alla sua destra, mentre le correnti erogate dalle SSE di sinistra e destra valgono rispettivamente 2419 A (Linea Blu) e 1758 A (Linea Rosa). La differenza di corrente erogata è dovuta agli squilibri nelle tensioni di alimentazione della linea di contatto e al fatto che la parte di linea a sinistra, rispetto a quella destra, risulta più caricata e questo porta la SSE di sinistra ad erogare una corrente maggiore. Il contenuto armonico delle correnti è quello tipico di un raddrizzatore a dodici impulsi. Anche in questo caso è stato valutato il rendimento di trasmissione del sistema. Le potenze erogate dalle SSE sono riportate nella tabella seguente.

Tabella 5.1 Valori delle potenze erogate dalle SSE sulle varie linee di contatto

SOTTOSTAZIONE	BINARIO	POTENZA(KW)
Sinistra	1	5.331
Centrale tratta a sinistra	1	4.323
Destra	1	5.775
Sinistra	2	3.133
Centrale tratta a sinistra	2	2.196
Centrale tratta a destra	1	4.183
Totale		24.941

Le potenze assorbite dai carichi sono invece:

Tabella 5.2 Valori delle potenze assorbite dai carichi

TRATTA OCCUPATA	BINARIO	POTENZA(KW)
Sinistra	1	7.843
Sinistra	2	4.769
Destra	1	7.95
Totale		20.569

5. SIMULAZIONI DI UNA TRATTA FERROVIARIA A 3 KV IN CORRENTE CONTINUA

Il rendimento di trasmissione risulta invece in questo caso pari a 0.825, molto simile a quello ricavato nel caso precedente.

5.2 Le simulazioni dinamiche

Una volta concluse le simulazioni statiche e analizzato i risultati ottenuti si è passati alle simulazioni dinamiche. Per questo tipo di simulazioni sono stati presi in considerazione dei modelli semplificati, ovvero le SSE sono rappresentate come dei generatori di tensioni in corrente continua come detto in precedenza. Si è potuto osservare che l'utilizzo di questi modelli semplificati fornisce delle forme d'onde in linea con quelle reali. I modelli considerati sono due: uno a singolo binario e l'altro a doppio binario, entrambi collegano due SSE per una lunghezza della tratta pari a 15 Km. In questo modo potremo osservare il diverso andamento della caduta di tensione nei due casi appena citati.

Inizialmente si andrà a ricavare le formule per i casi considerati, e una volta determinata l'equazione della caduta di tensione questa sarà implementata e ci fornirà l'andamento e il valore della caduta di tensione.

Le cadute di tensione in linea possono variare notevolmente. Le norme contenute nella Fiche 600 dell'UIC per il sistema a 3000 V in corrente continua stabiliscono che i valori delle cadute di tensione devono essere compresi fra -33 e +20% rispetto il valore nominale. Cioè la tensione della linea di contatto deve essere compresa fra 2000 e 3600 V. E' importante quindi verificare quali possono essere le cadute di tensione massime (ΔV_{max}) in linea, rilevate al pantografo dal mezzo di trazione, per evitare funzionamenti a tensione troppo bassa. Da notare che le tensioni eventualmente eccedenti i 3600 V dipendono dalle alimentazioni e dalle regolazioni di SSE e si verificano di solito a circuito aperto. Se, per effetto dei sovraccarichi, la tensione al pantografo scende al di sotto di 2000V, di solito vengono presi subito provvedimenti limitativi del traffico stesso. Per esempio, viene disposta la soppressione dei treni pesanti (merci) in attesa di poter attuare migliorie col rafforzamento della linea di contatto, aumentando la sua sezione. Il potenziamento della linea di contatto va preso, per criteri di unificazione, per l'intera linea o per lo meno fra SSE e SSE. Talora però si può rimediare alle eccessive cadute di tensione in una parte della linea mettendo in parallelo alla linea di contatto un apposito feeder utilizzando gli stessi sostegni della ldc.

Oltre alle cadute di tensione massime possono essere interessanti anche quelle medie che incidono sui consumi energetici, ovvero sul rendimento di trasmissione della linea. Esso si può esprimere con la formula:

$$\eta = \frac{1 - \Delta V_m}{E} \quad (5.1)$$

dove V_m è il valore medio delle cadute di tensione nella ldc, quando il mezzo di trazione percorre la tratta in esame, e E è la tensione nominale di alimentazione delle SSE.

Prima di andare ad analizzare i diversi casi si va ad introdurre dei parametri che saranno utili per ricavare l'andamento della caduta di tensione, potenza, corrette ecc. Tali grandezze sono:

E_a, E_b : tensioni erogate (fornite) dalle due SSE (V)

I_a, I_b : correnti erogate dalle due SSE (A)

I: corrente assorbita dal carico (A)

L: lunghezza della tratta considerata (km)

r: resistenza chilometrica della linea di contatto più quella del binario (Ω/km)

5.2.1. Caso due SSE a doppio binario con $E_a = E_b = E$

Si suppone che il carico sia unico e assorba una corrente $I=2950\text{A}$ e che la lunghezza della tratta sia pari a $L=15\text{ km}$.

5. SIMULAZIONI DI UNA TRATTA FERROVIARIA A 3 KV IN CORRENTE CONTINUA

La linea viene alimentata agli estremi da due sottostazioni ideali, con tensione identiche e resistenza interna trascurabile, ovvero $E_a = E_b = E = 3450 \text{ V}$, per le correnti invece si avrà $I_a + I_b = I$.

Dato che il carico è unico è unico le due correnti erogate dalle SSE sono direttamente proporzionali alla distanza x dal carico.

Ora si calcola la tensione alla distanza x da una sottostazione, rispettivamente da quella di sinistra o quella di destra, nel modo che segue:

$$V = E - r \cdot I_a \cdot x = E - r \cdot (L - x) \cdot (I - I_a) \quad (5.2)$$

Dove r sta ad indicare la somma fra la resistenza della linea di contatto e quella del binario che valgono rispettivamente 0.04704 e $0.014 \text{ } \Omega/\text{km}$. Si ottiene quindi:

$$I_a \cdot x = (L - x) \cdot (I - I_a) \quad (5.3)$$

Finendo a:

$$I_a(x) = I_a = \frac{(L - x)}{L} \cdot I \quad (5.4)$$

Lo stesso si poteva ricavare partendo dalla sottostazione di destra. Nel caso appena esaminato la corrente $I_b = \frac{x}{L} \cdot I$.

Si può notare che se:

- $x = 0$ $I_a(x) = I$ La corrente viene fornita tutta dalla SSE_a
- $x = L$ $I_a(x) = 0$ La corrente viene fornita tutta dalla SSE_b

Sostituendo la corrente all'interno della formula della tensione, si ottiene che:

$$V = E - r \cdot \frac{(L - x)}{L} \cdot I \cdot x \quad (5.5)$$

Quindi l'andamento della caduta di tensione risulta:

$$\Delta V_x = E - V = r \cdot \frac{(L - x)}{L} \cdot I \cdot x \quad (5.6)$$

La caduta di tensione è regolata da una legge quadratica in funzione della posizione e raggiunge il suo valore massimo a metà della tratta. Si ottiene quindi

$$\Delta V_{max} = \Delta V_{x=\frac{L}{2}} = r \cdot \frac{\left(L - \frac{L}{2}\right)}{L} \cdot I \cdot \frac{L}{2} = \frac{r \cdot I \cdot L}{4} \quad (5.7)$$

Il calcolo della caduta di tensione media fornisce invece il seguente risultato.

$$\Delta V_{media} = \frac{1}{L} \int_0^L r \cdot I \cdot x \cdot \frac{(L - x)}{L} \cdot dx = \frac{r \cdot I \cdot L}{6} = \frac{2}{3} \cdot \Delta V_{max} \quad (5.8)$$

Con i dati utilizzati nel modello, si ottiene il seguente andamento per la caduta di tensione.

5. SIMULAZIONI DI UNA TRATTA FERROVIARIA A 3 KV IN CORRENTE CONTINUA

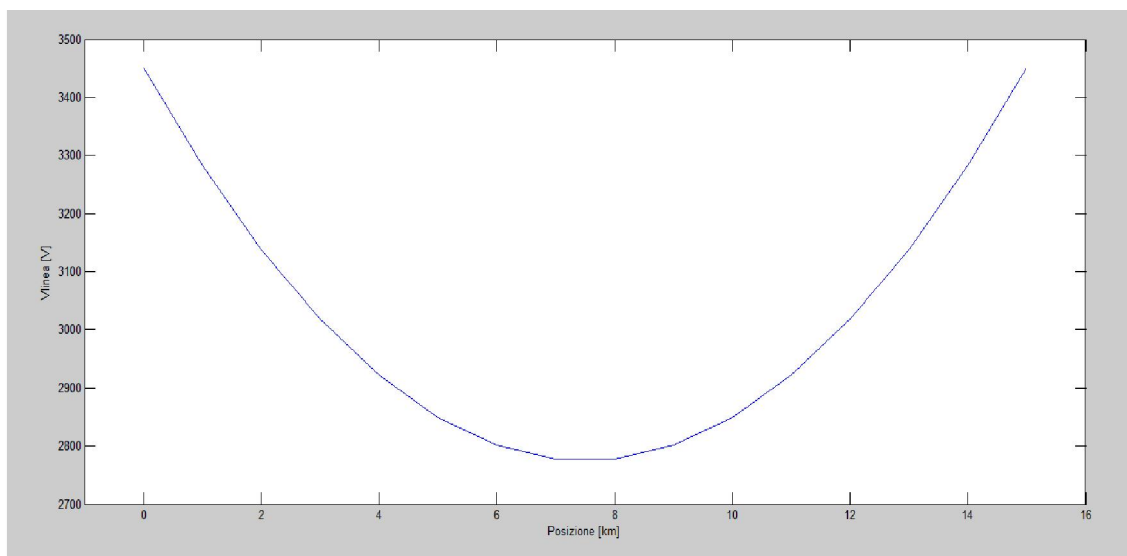


Figura 5.11 Andamento della tensione a lungo la linea di contatto

La tensione presenta un minimo in corrispondenza del centro della tratta (7,5 km). In questo punto la tensione vale 2780 V, in linea con i risultati previsti.

La potenza assorbita dal treno si presenta nel seguente modo:

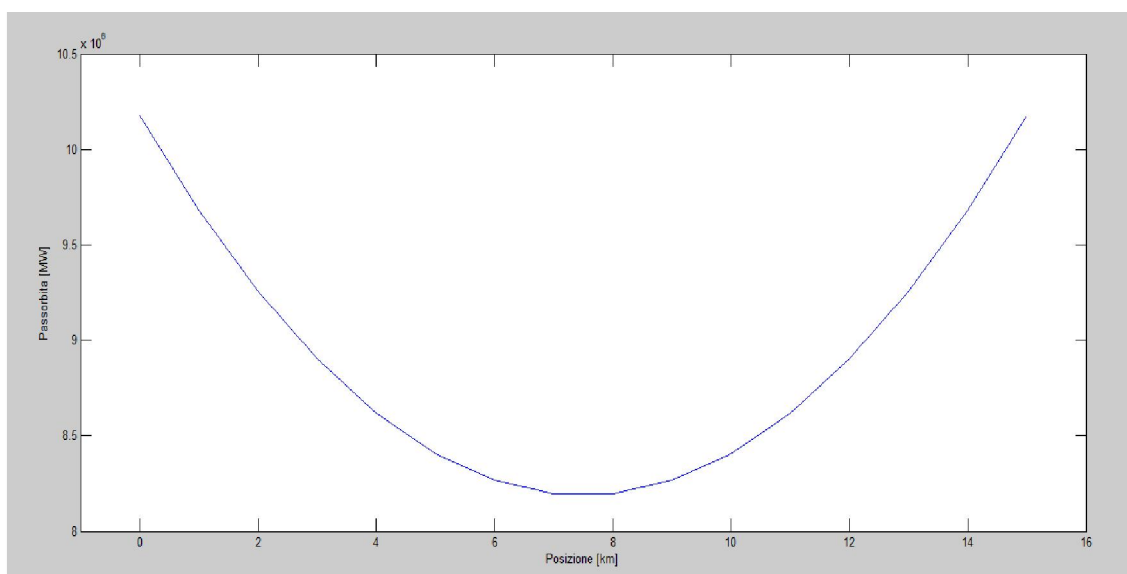


Figura 5.12 Potenza assorbita dal treno lungo la tratta considerata

La potenza assorbita, come si può notare dal grafico, assume un valore in linea con quello presunto, cioè il convoglio assorbe una potenza media di circa 9 MW. Il picco minimo si ha in corrispondenza del centro della tratta (in questo punto la tensione assume il suo valore minimo) che vale circa 8,2 MW, mentre l'assorbimento maggiore di potenza si ha in corrispondenza delle SSE.

L'andamento della corrente erogata dalla SSE_a in funzione della posizione del convoglio è il seguente:

5. SIMULAZIONI DI UNA TRATTA FERROVIARIA A 3 KV IN CORRENTE CONTINUA

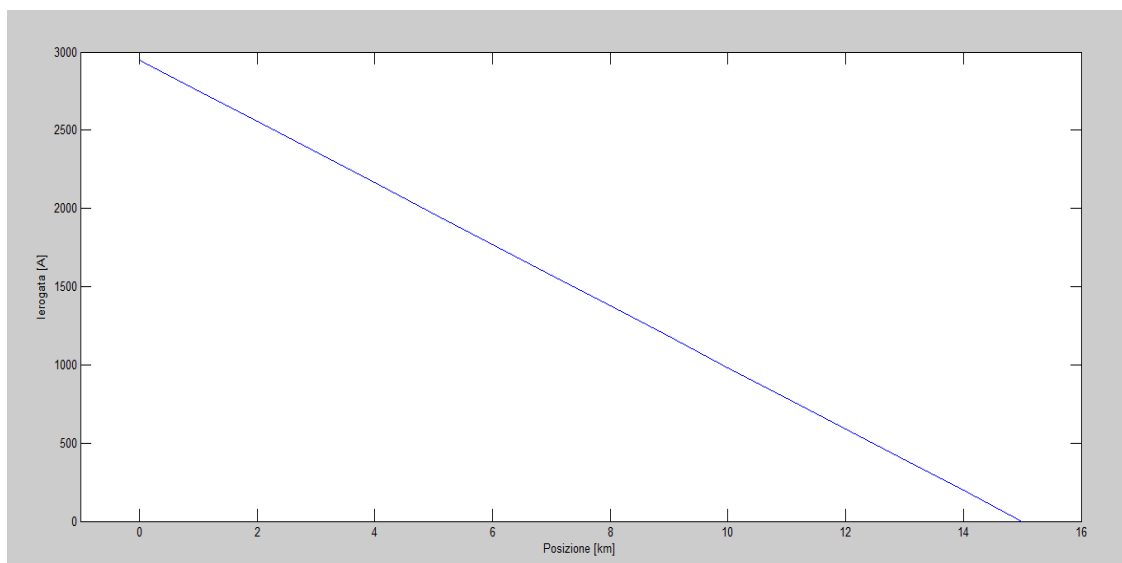


Figura 5.13 Corrente erogata dalla SSE di sinistra

La corrente presenta un andamento lineare con la posizione del convoglio. Essa è massima per $x = 0$, ovvero in uscita dalla SSE_a e si annulla alla fine della tratta considerata cioè in $x = 15$. Un andamento analogo si potrebbe ricavare per la corrente I_b fornita dalla sottostazione di destra.

La potenza erogata dalla SSE_a in relazione allo spazio percorso dal convoglio presenta il seguente andamento:

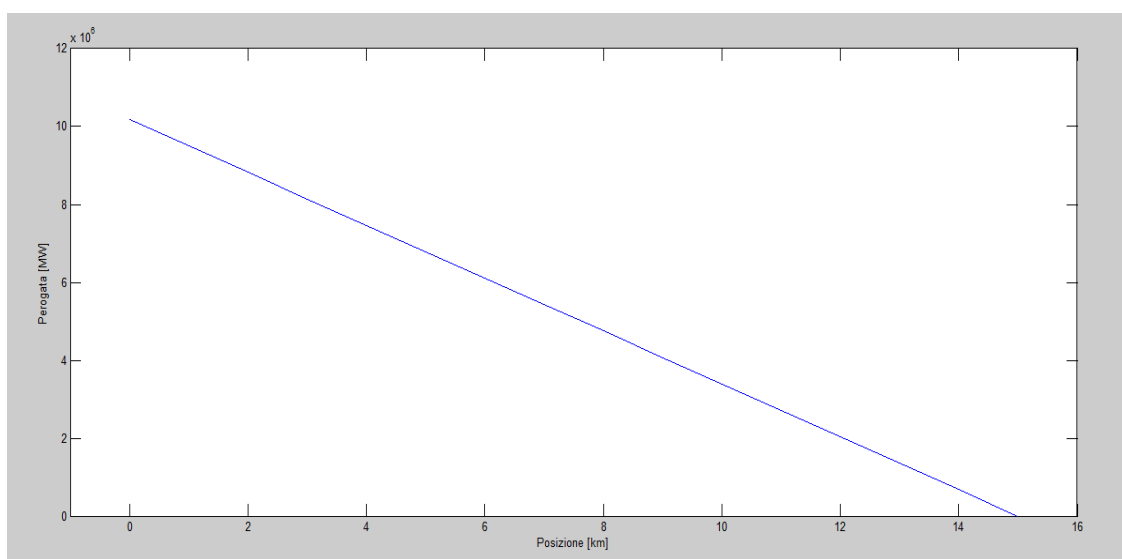


Figura 5.14 Potenza erogata dalla SSE di sinistra

Anche la potenza decresce in modo lineare man mano che il treno si allontana dalla sottostazione fino ad annullarsi quando il convoglio è in corrispondenza della SSE_b . Essa assume un valore medio di circa 5,1 MW.

5.2.2. Caso due SSE a doppio binario con $E_a \neq E_b$

Mantenendo gli stessi dati del caso precedente, si suppone che le due tensioni, messe in gioco dalle SSE, siano diverse (come accade per un caso reale), ossia $E_a \neq E_b$ con valori pari a 3450 V per la sottostazione di sinistra e 3430V per quella di destra.

5. SIMULAZIONI DI UNA TRATTA
FERROVIARIA A 3 KV IN CORRENTE CONTINUA

Dato che le due tensioni sono diverse avremo una differenza di potenziale *pari a* :

$$E_a - E_b = \Delta E \quad (5.9)$$

Da questa differenza di potenziale nascerà una corrente di ricircolo I_c uguale a :

$$I_c = \frac{E_a - E_b}{r \cdot L} = \frac{\Delta E}{r \cdot L} \quad (5.10)$$

Ricordando il caso visto in precedenza e applicando il principio di sovrapposizione degli effetti si trova:

$$\begin{cases} I_a(x) = \frac{(L-x)}{L} \cdot I + I_c = \frac{(L-x)}{L} \cdot I + \frac{\Delta E}{r \cdot L} \\ I_b(x) = I - \frac{(L-x)}{L} \cdot I - I_c = \frac{x}{L} \cdot I - \frac{\Delta E}{r \cdot L} \end{cases} \quad (5.11)$$

Dalla relazione sulla caduta di tensione precedente si può ricavare:

$$\Delta V_x = r \cdot \frac{(L-x)}{L} \cdot I \cdot x + r \cdot x \cdot I_c = r \cdot I \cdot x - r \cdot I \cdot \frac{x^2}{L} + \frac{\Delta E}{L} \cdot x \quad (5.12)$$

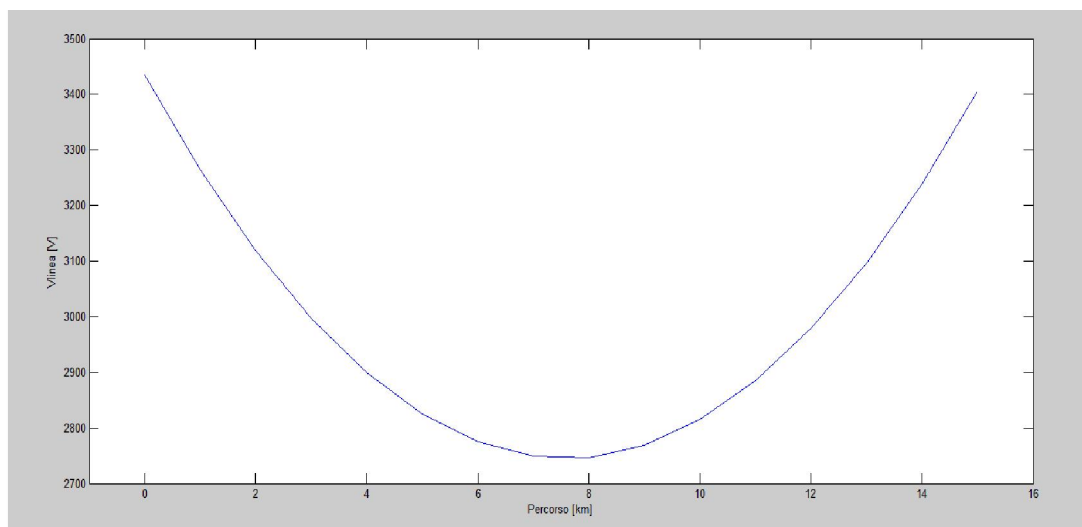
Per trovare il punto di massimo (o minimo della tensione di linea) si esegue la derivata della caduta di tensione rispetto ad x.

$$\frac{d\Delta V_x}{dx} = r \cdot I - \frac{2 \cdot x \cdot r \cdot I}{L} + \frac{\Delta E}{L} = 0 \quad (5.13)$$

Si ricava il punto per cui è massima la caduta di tensione, la cui coordinata x vale:

$$x_{\Delta V_{max}} = \left(r \cdot I + \frac{\Delta E}{L} \right) \cdot \frac{L}{2 \cdot I \cdot r} = \frac{L}{2} \cdot \left(1 + \frac{\Delta E}{L \cdot I \cdot r} \right) = \frac{L}{2} \cdot \left(1 + \frac{I_c}{L} \right) \quad (5.14)$$

La ΔV_{max} è quindi spostata verso la sottostazione che eroga la tensione minore. Quanto detto è stato verificato tramite un codice in matlab che conferma quanto scritto in precedenza. L'andamento della caduta di tensione di tensione è riportato di seguito, i valori utilizzati per le grandezze sono quelli ricavati dai modelli precedenti.



5. SIMULAZIONI DI UNA TRATTA FERROVIARIA A 3 KV IN CORRENTE CONTINUA

Figura 5.15 Andamento della tensione al pantografo

In questo caso la tensione presenta un minimo subito dopo la metà della tratta considerata (8 km). Tale punto, come messo in evidenza precedentemente, è spostato verso la SSE che fornisce la tensione più bassa (quella di destra) e vale circa 2750V.

La potenza assorbita dal carico è riportata nel grafico seguente

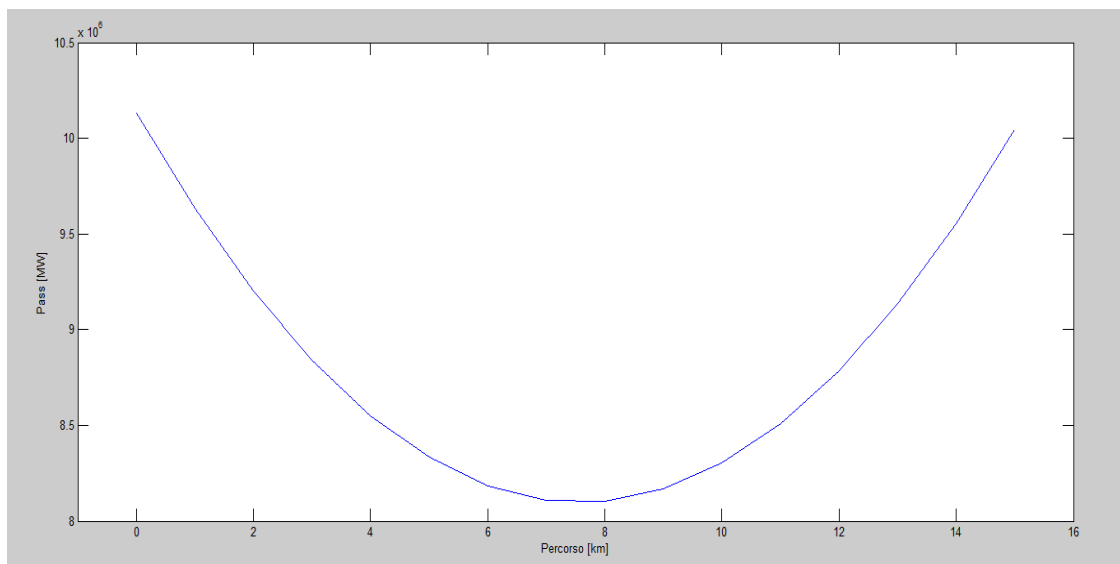


Figura 5.16 Andamento della potenza assorbita dal convoglio lungo la tratta considerata

La potenza presenta un picco dopo metà tratta e assume un valore pari a 8,11 MW. Il treno durante la sua marcia assorbe una potenza media di circa 9 MW.

La corrente erogata dalla sottostazione di sinistra presenta il seguente andamento:

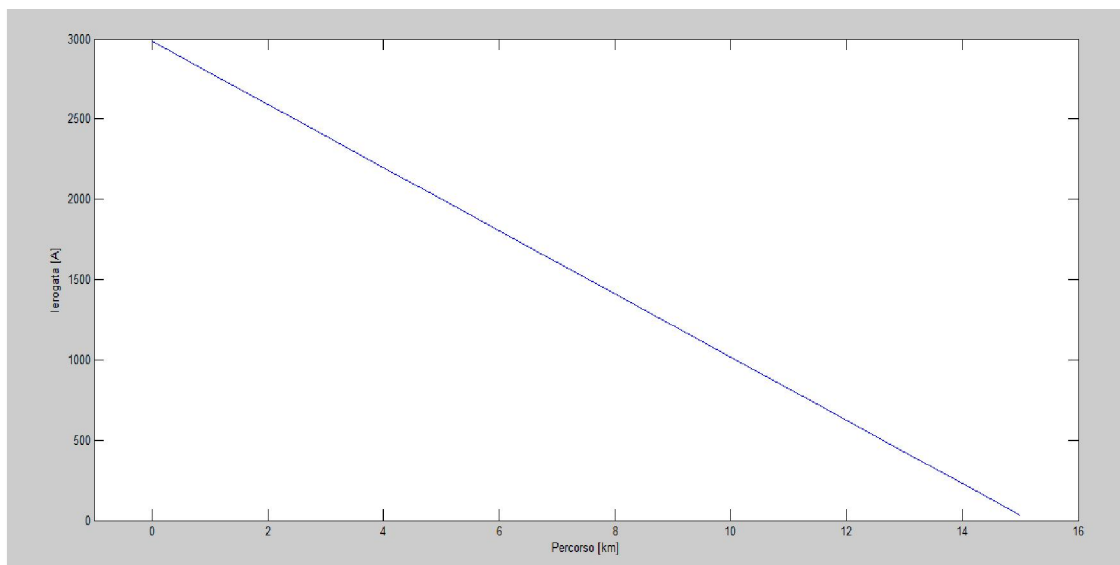


Figura 5.17 Corrente erogata dalle SSE di sinistra

La corrente varia sempre in modo lineare con lo spazio percorso ma a differenza del caso precedente il suo valore risulta superiore in quanto si deve tenere conto della corrente di ricircolo I_c dovuta alla differenza delle tensioni erogate dalle sottostazioni. Si può notare che per $x = 15$ la corrente $I_a \neq 0$. L'andamento della potenza erogata dalla SSE_a è il seguente:

5. SIMULAZIONI DI UNA TRATTA FERROVIARIA A 3 KV IN CORRENTE CONTINUA

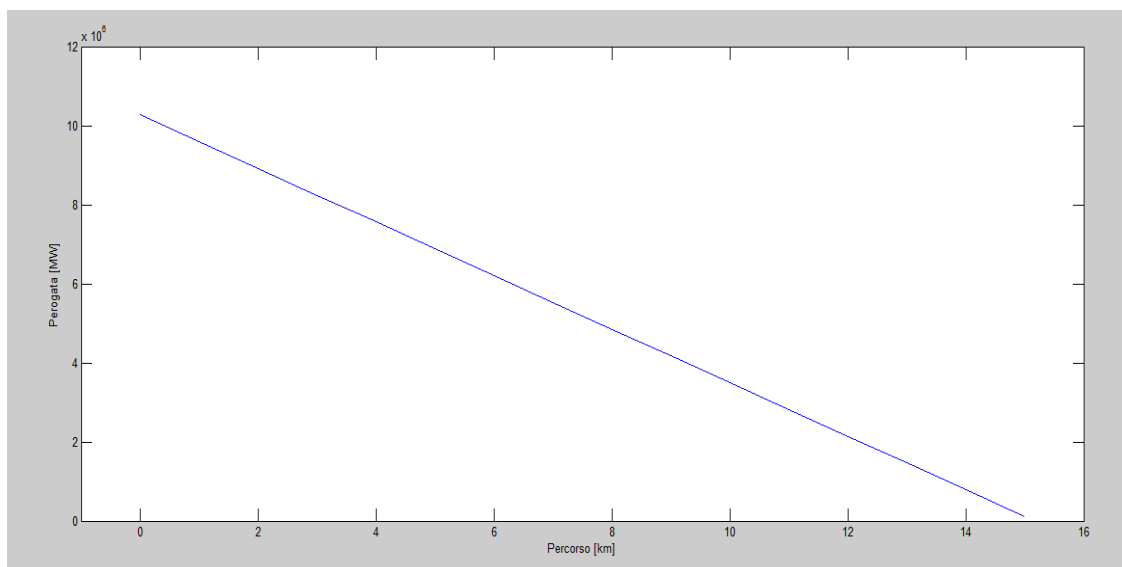


Figura 5.18 Potenza erogata dalle SSE di sinistra

Anche la potenza, come la corrente, varia in modo lineare con lo spazio percorso. Alla distanza $x = 0$ assume il suo valore massimo mentre alla distanza $x = 15$ il suo valore minimo che non è zero a causa della corrente di ricircolo I_c . La potenza media erogata vale circa 5,5 MW.

5.2.3. Caso due SSE a doppio binario con $E_a = E_b = E$

Mantenendo sempre i dati precedenti ($E = 3450 V$), ora si analizza una linea a doppio binario, dove il collegamento in parallelo dei due binari viene fatto a metà della tratta considerata, in modo da ridurre le cadute di tensione lungo la linea. Supponendo che le due SSE erogino la stessa tensione E .

I_a : Corrente erogata dalla SSE_a sulla linea caricata

la corrente $(I - I_a)$ arriverebbe tutta dal lato destro del treno. Effettuando il collegamento in parallelo a metà della tratta, la corrente in esame arriva nel punto indicato confluendo da tre percorsi differenti (le due linee afferenti alla SSE_b e la seconda alimentata dalla SSE_a). Dato che i tre rami del circuito presentano la stessa impedenza, la corrente risulta equamente distribuita tra di essi. La caduta di tensione in funzione della coordinata x , valida per $0 \leq x \leq L/2$, risulta essere pari a:

$$\Delta V_x = r \cdot x \cdot I_a = r \cdot (I - I_a) \cdot \left(\frac{L}{2} - x\right) + r \cdot \frac{(I - I_a)}{3} \cdot \frac{L}{2} \quad (5.15)$$

ottenendo l'espressione della corrente I_a

$$x \cdot I_a = (I - I_a) \cdot \left(\frac{L}{2} - x\right) + r \cdot \frac{(I - I_a)}{3} \cdot \frac{L}{2} \quad (5.16)$$

$$I_a(x) = \frac{I \cdot \left(\frac{2}{3} \cdot L - x\right)}{\frac{2}{3} \cdot L} \quad (5.17)$$

sostituendo nella prima equazione la corrente $I_a(x)$ si può ricavare l'andamento della caduta di tensione per la tratta compresa tra $0 \leq x \leq L/2$.

$$\Delta V_x = r \cdot x \cdot I_a = r \cdot x \cdot \frac{I \cdot \left(\frac{2}{3} \cdot L - x\right)}{\frac{2}{3} \cdot L} \quad (5.18)$$

Si riconosce che l'espressione corrisponde alla caduta di tensione che si avrebbe se una singola linea fosse alimentata in modo bilaterale, dalle linee primarie in alta tensione, con una lunghezza pari a $2/3 \cdot L$.

5. SIMULAZIONI DI UNA TRATTA FERROVIARIA A 3 KV IN CORRENTE CONTINUA

Questo è stato verificato tramite l'implementazione di un codice Matlab che riproduce la caduta di tensione lungo la linea.

L'andamento è il seguente:

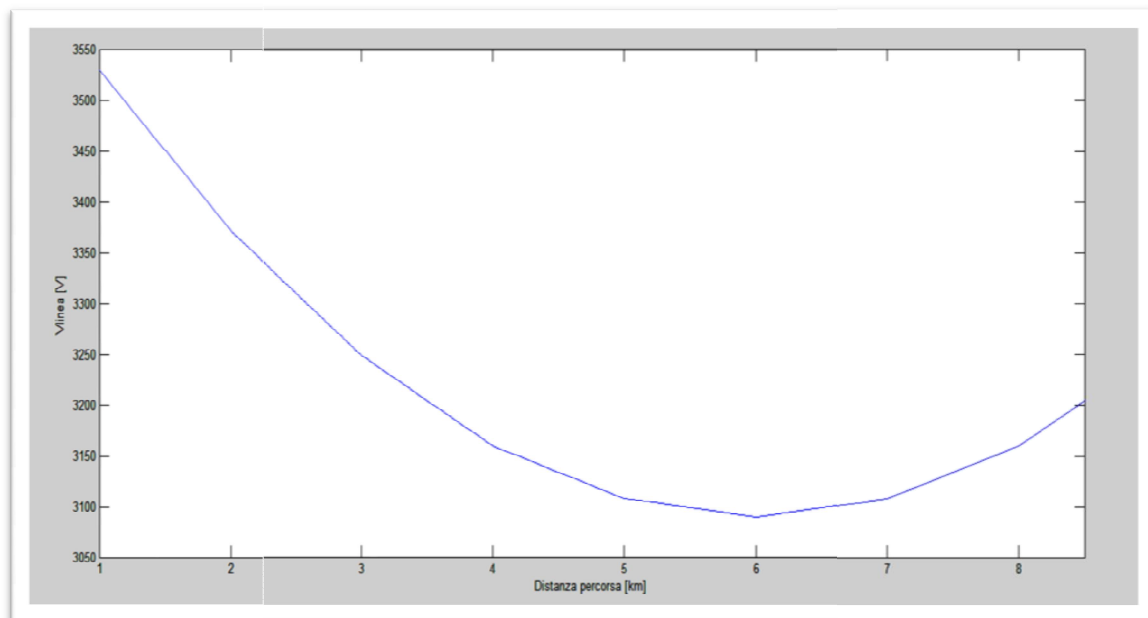


Figura 5.19 Andamento della tensione al pantografo nei primi 2/3 di linea

Dal grafico si può notare che il punto di minimo si raggiunge a 6 km , ovvero circa ad un terzo della tratta considerata. Il valore della tensione assorbita dal convoglio in questo punto è pari a 3090 V
La potenza assorbita dal convoglio presenta il seguente andamento:

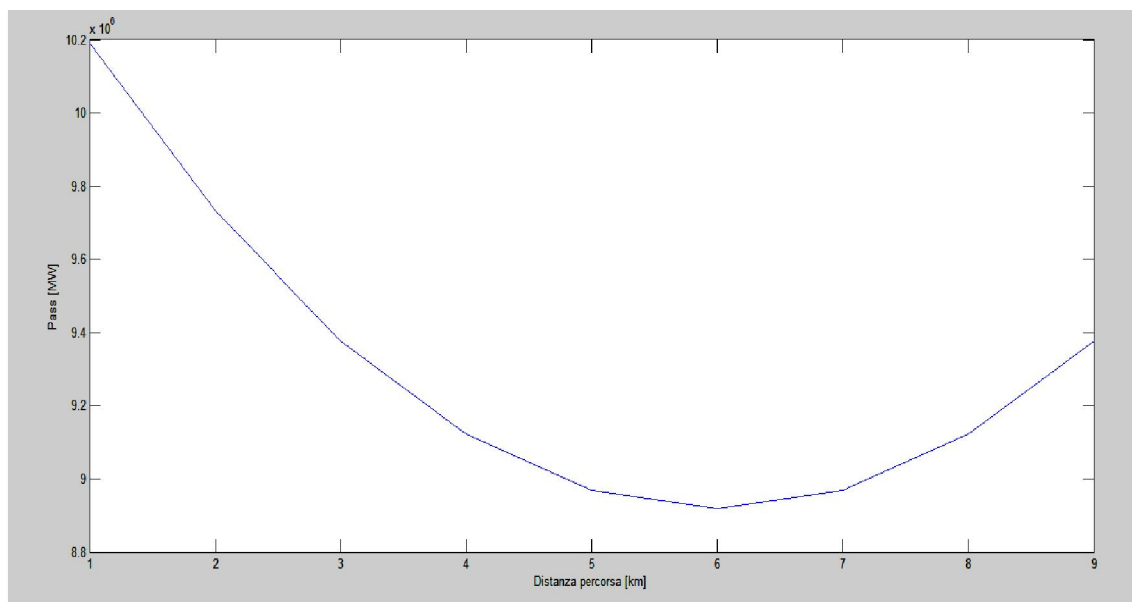


Figura 5.20 Andamento della potenza assorbita dal treno

La potenza, essendo supposta costante la corrente assorbita dal treno, presenta lo stesso andamento della tensione.

5. SIMULAZIONI DI UNA TRATTA FERROVIARIA A 3 KV IN CORRENTE CONTINUA

Nel punto di minimo il suo valore è di circa 8,92MW, mentre la potenza media assorbita è di circa 9,5 MW in linea con l'assorbimento classico di un convoglio AV/AC.

Per quanto riguarda la SSE_A , avendo supposto che la tensione sia costante, la corrente erogata assume il seguente andamento:

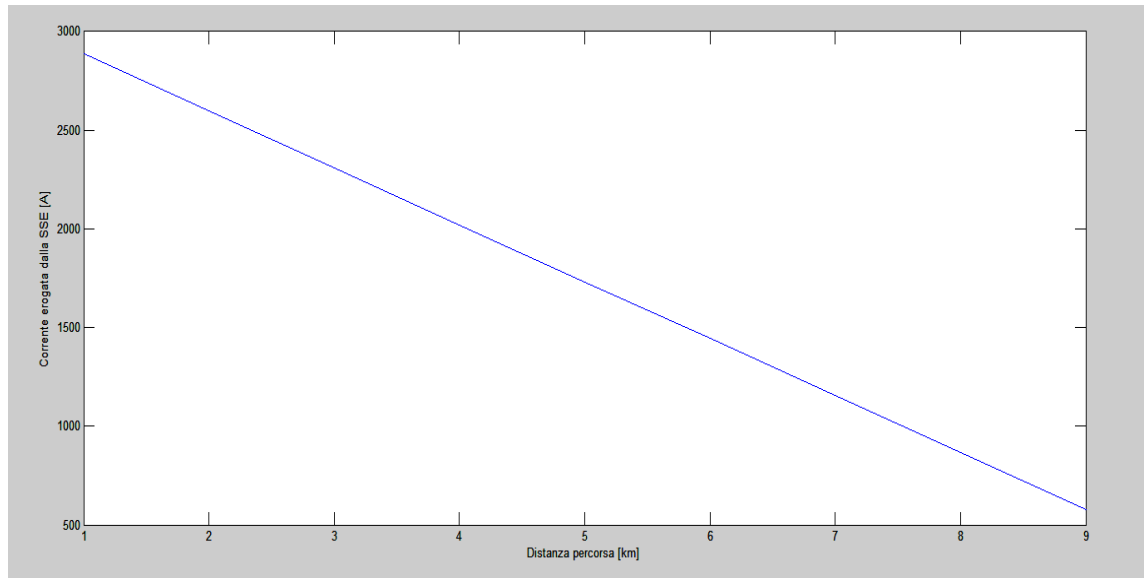


Figura 5.21 Andamento della corrente erogata dalla SSE_A

La corrente è massima in prossimità della sottostazione e diminuisce linearmente con l'allontanarsi del treno dalla sottostazione stessa. Il valore medio della I_A è di circa 1156 A. La potenza erogata dalla SSE presenta lo stesso andamento della corrente, ovvero massimo in corrispondenza della sottostazione e man mano che ci si allontana da essa diminuisce fino ad annullarsi.

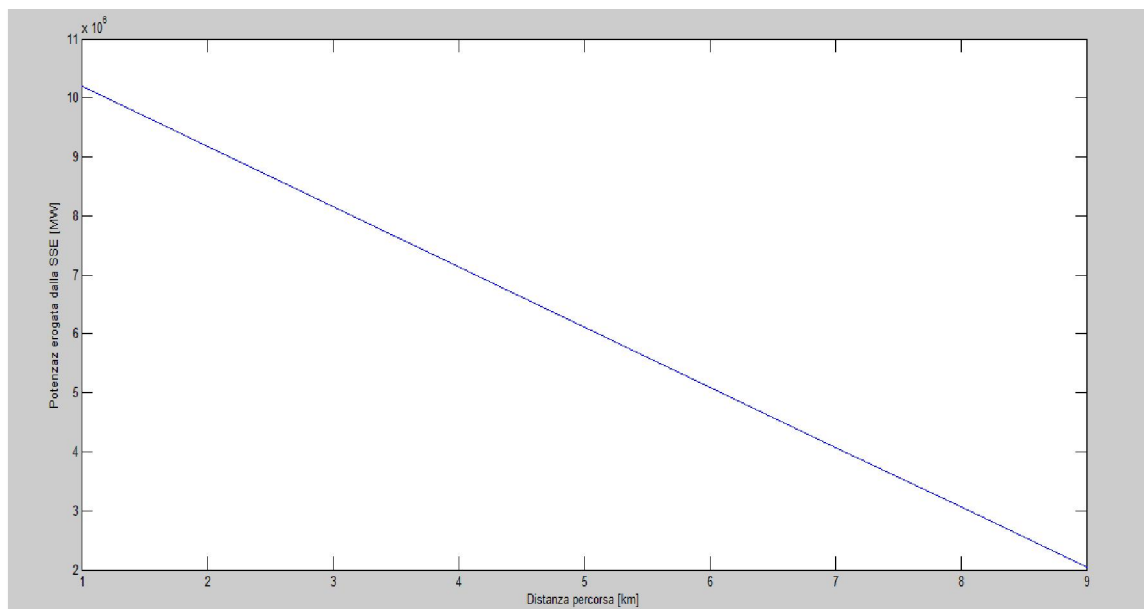


Figura 5.22 Andamento della potenza erogata dalla SSE_A

5. SIMULAZIONI DI UNA TRATTA FERROVIARIA A 3 KV IN CORRENTE CONTINUA

La potenza in corrispondenza della SSE vale 10,2 MW e va via via diminuendo, mentre la potenza media erogata, lungo la tratta considerata, è pari a 4,087 MW.

Tutti questi ultimi risultati sono validi solo per i primi 2/3 di linea, dato che, come si è scritto in precedenza, una linea a doppio binario può essere vista come una linea con alimentazione bilaterale di lunghezza 2/3 rispetto quella iniziale.

Inoltre, se il carico si trova nella metà prossima alla SSE_b , ossia per $L/2 \leq x \leq L$, il ragionamento da fare è lo stesso visto per il caso precedente e l'espressione della caduta di tensione è la seguente

$$\Delta V_x = r \cdot (L - x) \cdot I_b = r \cdot (L - x) \cdot \frac{I \cdot \left(x - \frac{1}{3} \cdot L\right)}{\frac{2}{3} \cdot L} \quad (5.19)$$

I massimi della caduta di tensione sono in corrispondenza di $x = \frac{1}{3} \cdot L$ e $x = \frac{2}{3} \cdot L$ assumendo in entrambi i casi il valore

$$\Delta V_{max} = \Delta V_{x=\frac{1}{3}} = \frac{r \cdot L \cdot I}{6} \quad (5.20)$$

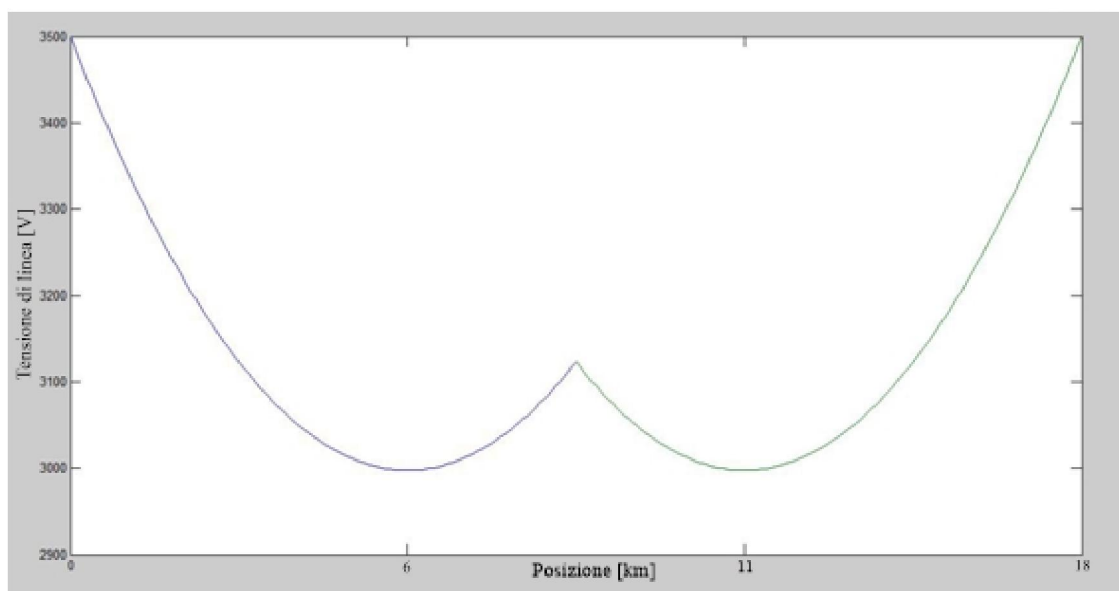


Figura 5.23 Andamento della tensione al pantografo lungo la tratta considerata

Considerando l'intera linea vedremo che la tensione presenta due picchi minimi in corrispondenza di $\frac{1}{3}$ e $\frac{2}{3}$ della lunghezza totale della tratta considerata.

6. Il sistema di alimentazione 2x3 kV

Dalle simulazioni effettuate sui modelli che andavano a rappresentare il sistema di alimentazione tradizionale sono state messe in evidenza le criticità del sistema, soprattutto in previsione di un aumento della potenzialità delle linee esistenti. Le cadute di tensione, soprattutto verso il centro della tratta alimentata dalla SSE, risultano essere troppo elevate per garantire un'adeguata alimentazione dei convogli. Per questo motivo si vuole cercare una soluzione che porti un aumento della potenzialità delle linee senza andare a stravolgere interamente il sistema ferroviario esistente.

Basandoci sul sistema Alta Velocità/Alta Capacità che è in fase di costruzione, si vuole cercare di applicare lo stesso principio di funzionamento alle tratte alimentate a 3 kV in corrente continua. Tale sistema prevedrà non solo più un complesso di conduttori dedicato all'alimentazione dei convogli, ma due sistemi di conduttori distinti: uno esercito a +3 kV, sempre responsabile dell'alimentazione dei treni e il secondo esercito a -3kV, che ha come unico scopo quello del trasporto dell'energia elettrica. Il collegamento del circuito di alimentazione al gruppo di convertitori sarà diverso. Il feeder positivo sarà sempre collegato al positivo della sbarra in SSE, mentre alla sbarra catodica sarà invece collegato il feeder negativo e non più il circuito di ritorno delle correnti di linea (cioè il binario). Affinché i conduttori siano eserciti a +3kV e -3kV, il ponte raddrizzatore non potrà più prevedere il collegamento in parallelo dei due rami, che saranno connessi in serie. Il binario viene quindi connesso al centro dei due ponti raddrizzatori, che non risulterà più della tipologia a dodici impulsi, ma bensì a sei impulsi con un conseguente aumento delle armoniche nel circuito di alimentazione. Fondamentale per il corretto funzionamento di tutto il sistema risulterà la presenza di un punto di conversione statica, che ricoprirà il ruolo che hanno gli autotrasformatori nel sistema 2x25 kV. Il convertitore statico ha quindi la funzione di permettere lo scambio di energia tra i due feeder, svolgendo il ruolo di una sorta di trasformatore elettronico di potenza.

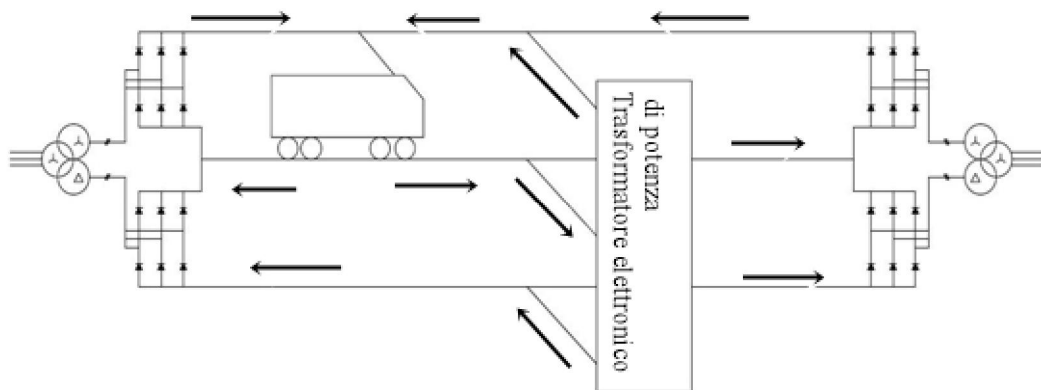


Figura 6.1 Schema del nuovo sistema di alimentazione proposto con evidenziato il verso delle correnti

Il sistema consente il trasporto di parte dell'energia a una tensione superiore (+6kV totali) rispetto al sistema tradizionale, riducendo conseguentemente le cadute di tensione sulla linea di contatto. Parte della corrente, in uscita dalle SSE, percorrerà infatti il feeder negativo al posto della linea di contatto. Il punto di conversione può essere comandato in modo tale da controllare alcuni parametri relativi alla linea di contatto, come la tensione a metà tratta o la corrente erogata dalle SSE. In questo modo è possibile aumentare la potenzialità della linea, in relazione alle possibilità del convertitore statico, senza pregiudicare l'alimentazione dei convogli.

6.1. Modelli utilizzati nelle simulazioni

Come fatto per il caso precedente sono stati sviluppati diversi modelli, per riuscire ad eseguire sia le simulazioni di tipo statico, sia quelle di tipo dinamico.

6. IL SISTEMA DI ALIMENTAZIONE 2X3 KV

Per le simulazioni statiche sono stati presi in considerazione due modelli, il primo riguardante una tratta, a doppio binario, di 15 km alimentata da due SSE. Le sottostazioni sono alimentate solo da un lato dalla rete nazionale di trasmissione e collegate tra loro tramite linee primarie.

Il carico è posto al centro della tratta e rappresentato con una resistenza (R_1) di valore pari a 1Ω , mentre il secondo riguardante una tratta, sempre a doppio binario, di 30 km alimentata da tre SSE, dove tali sottostazioni sono alimentate in modo bilaterale dalla rete di trasmissione. In questo caso i carichi sono tre, dove due di questi sono posti nel primo binario, mentre il terzo nel binario due. I convogli sono sempre rappresentati tramite resistenza di valore pari a 1Ω per quelli sul binario uno e 2Ω per quello sul binario due. Per la realizzazione dei modelli statici si sono presi in considerazione gli stessi blocchi utilizzati nei modelli visti per il sistema a 3 kV in corrente continua ad eccetto del blocco SSE il quale risulta essere differente rispetto a quello visto in precedenza. Il blocco "SSE" utilizzato per rappresentare il modello relativo al sistema 2x3 kV è il seguente:

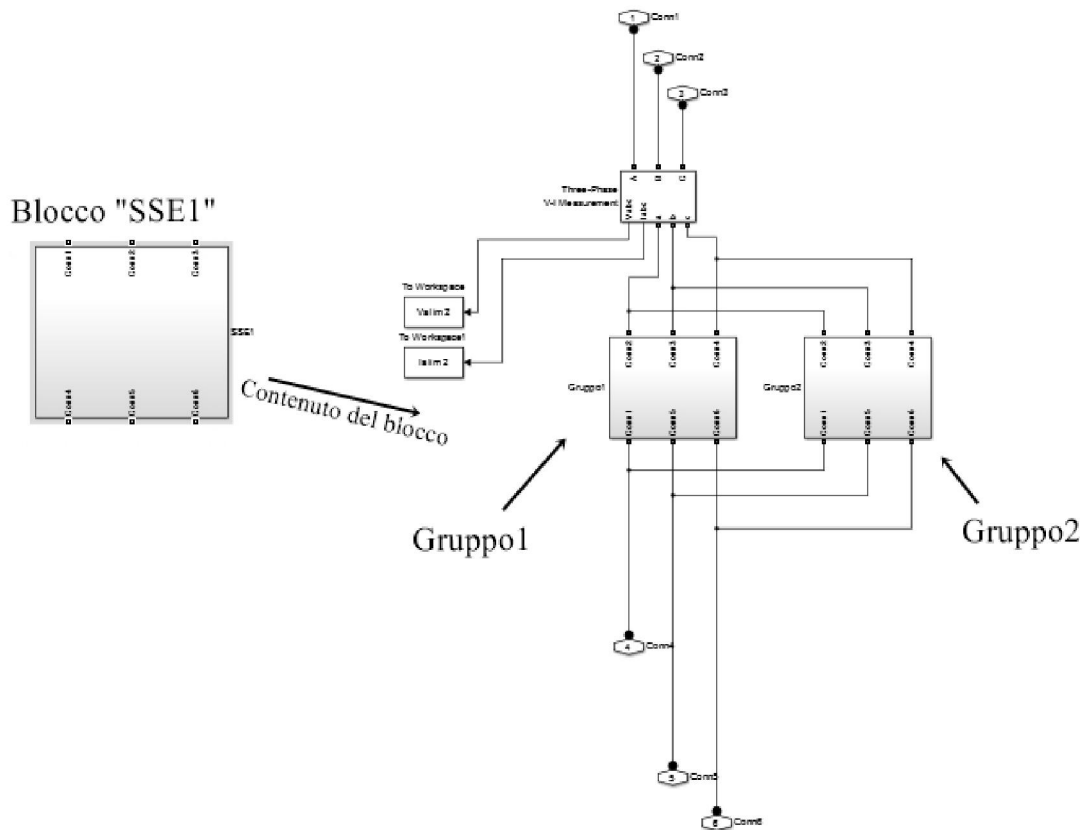


Figura 6.2 Rappresentazione del blocco "SSE1"

All'interno del blocco "SSE1" sono contenuti altri due blocchi definito gruppo i quali contengono il trasformatore a tre avvolgimenti (uguale al precedente) e due raddrizzatori a sei impulsi che diversamente da prima sono connessi in serie in modo da avere in uscita una tensione, tra linea di contatto e feeder negativo, pari a 6 kV. Dopo i raddrizzatori si trova un doppio filtro passa basso, uno relativo al feeder positivo e il secondo relativo al feeder negativo. Il valore della capacità è rimasto pari a $360 \mu\text{F}$ mentre quello dell'induttanza è stato aumentato a 10 mH in modo da filtrare maggiormente le armoniche di tensione generate dal gruppo raddrizzatore. L'inserzione di un filtro anche sul feeder negativo è stato necessario per evitare possibili fenomeni di risonanza che portavano ad avere un ripple di tensione più cospicuo. Il blocco "Gruppo1" è rappresentato nella figura seguente:

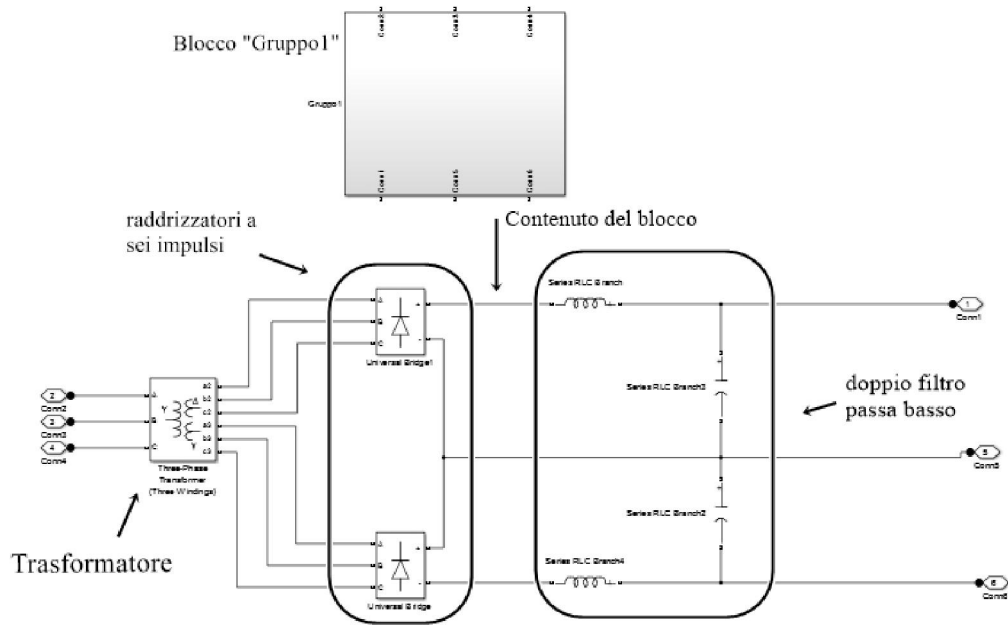


Figura 6.3 Rappresentazione del nuovo blocco "Gruppo1"

L'altro blocco diverso rispetto al caso tradizionale è quello relativo al binario il quale presenta in più la resistenza relativa all'alimentatore negativo che presenta un valore uguale a quello della resistenza della catenaria. Quindi il nuovo blocco "Binario1" o "Binario2" è il seguente:

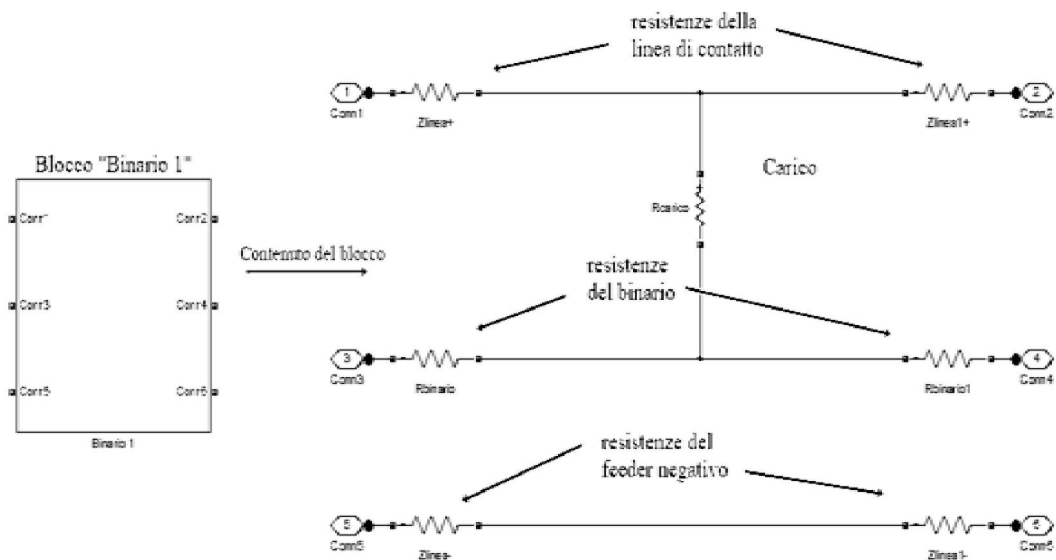


Figura 6.4 Rappresentazione del nuovo blocco "Binario 1"

Una volta descritti i nuovi blocchi utilizzati si è passati alla costruzione dei modelli per le simulazioni statiche che verranno eseguite prima senza la presenza del convertitore elettronico di potenza e successivamente col DC-DC.

6.1.1. Modello a 2 SSE di una tratta a doppio binario con alimentazione 2x3 kV senza convertitore DC/DC

Tale modello si ottiene utilizzando i blocchi descritti nel capitolo 4 e quelli appena introdotti, quando sarà introdotto il convertitore DC-DC esso sarà inserito all'interno del blocco "Binario1" o "Binario 2".

Lo schema del modello a due SSE è il seguente:

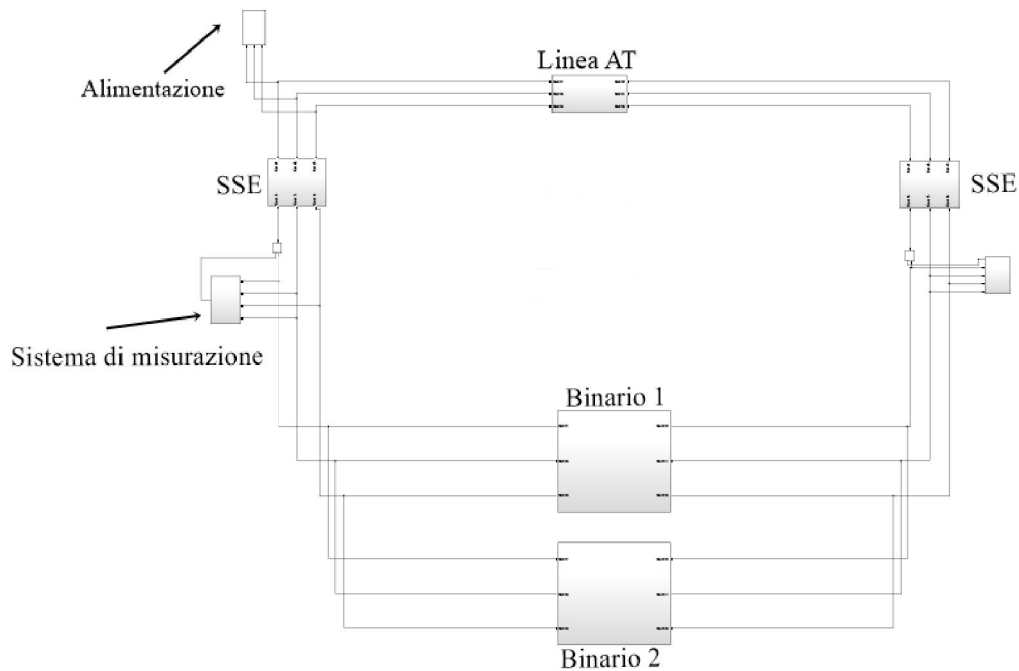


Figura 6.5 Modello a due SSE con alimentazione 2x3 kV per le simulazioni statiche senza convertitore DC/DC

Dai risultati, che vengono illustrati nel paragrafo successivo, si può osservare che un sistema di questo tipo, senza convertitore DC/DC, presenta un rendimento di trasmissione inferiore al sistema tradizionale.

Oltre al modello reale è possibile considerare un modello medio dove le SSE, linee primarie AT e alimentazione vengono sostituite con un generatore ideale di tensione continua e costante in serie con la sua impedenza interna di tipo $R - L_S$, dove il tutto viene posto all'interno del nuovo blocco "Alimentazione + SSE". Il blocco del binario è uguale a quello utilizzato nel modello più completo.

Il nuovo blocco "Alimentazione + SSE" è il seguente:

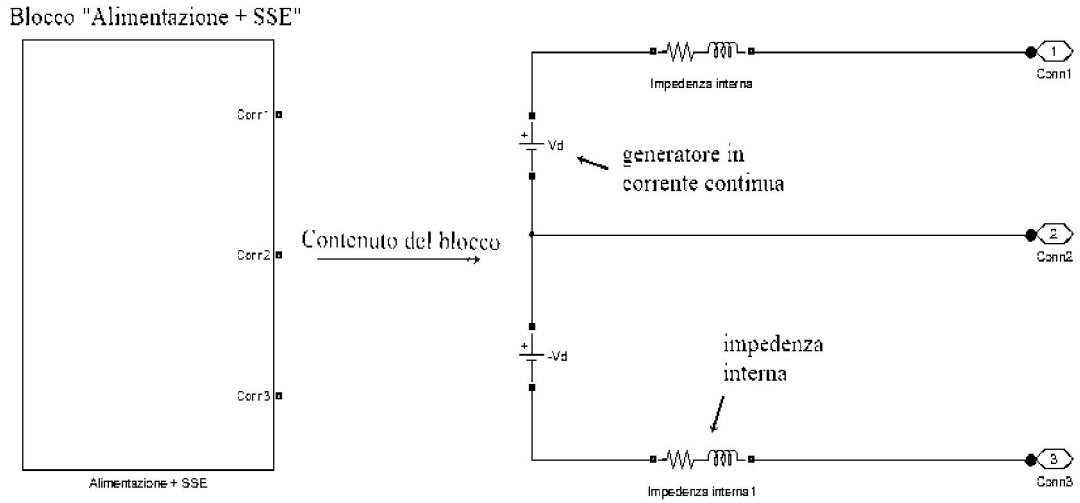


Figura 6.6 Rappresentazione del nuovo blocco "Alimentazione + SSE"

Quindi il modello medio di una tratta a doppio binario alimentata da due SSE senza convertitore DC-DC è il seguente:

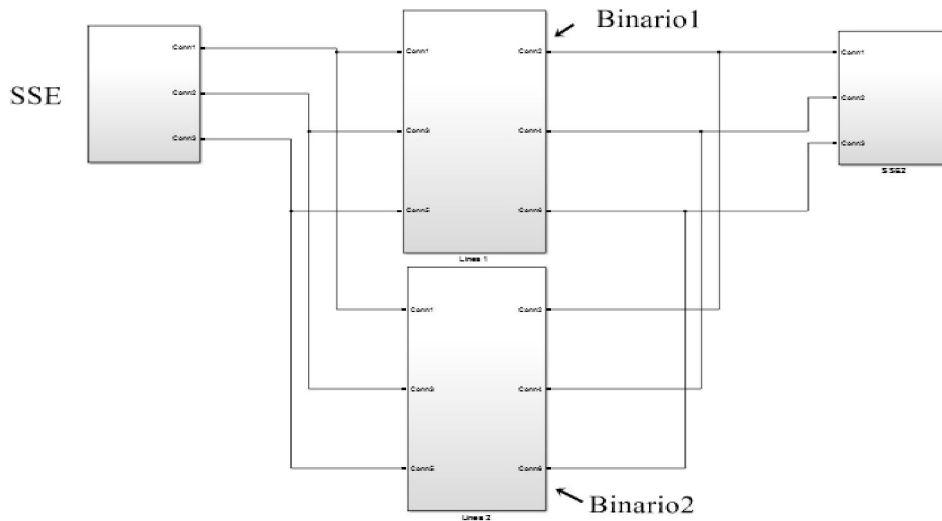


Figura 6.7 Modello medio a due SSE con alimentazione 2x3kV senza convertitore DC/DC

6.1.2. Modello a tre SSE di una tratta a doppio binario con alimentazione 2x3 kV senza convertitore DC/DC

Per la tratta a tre sottostazioni possono essere fatte le stesse considerazioni di quella a due sottostazioni, l'unica differenza sta nel fatto che la tratta è alimentata da entrambi i lati. I blocchi utilizzati per la realizzazione del modello completo e del modello medio sono gli stessi del modello precedente. Di seguito vengono riportati gli schemi dei due modelli appena citati

6. IL SISTEMA DI ALIMENTAZIONE 2X3 KV

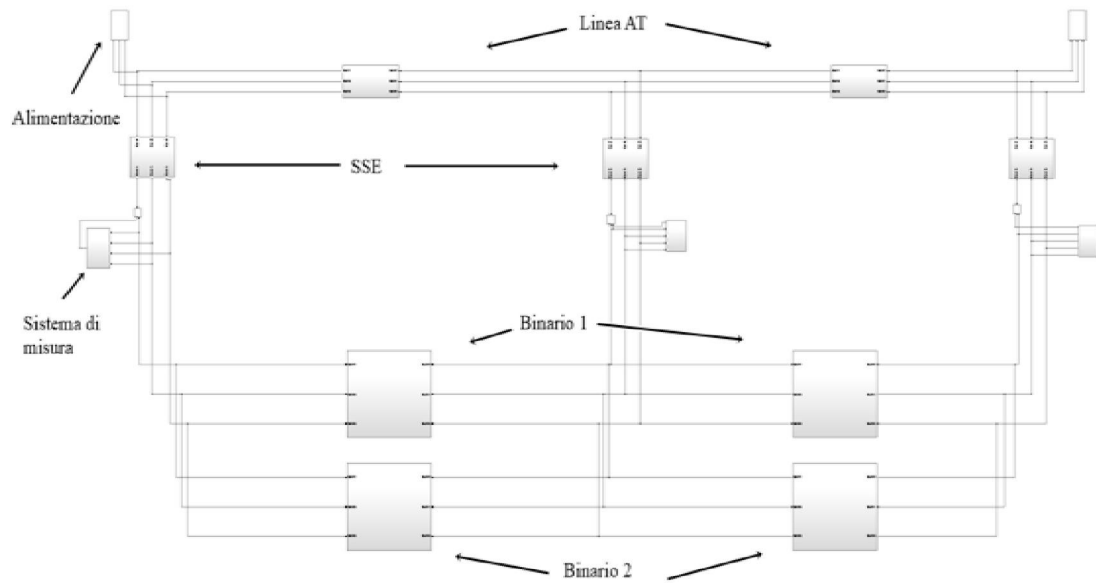


Figura 6.8 Modello a tre SSE con alimentazione 2x3kV senza convertitore DC/DC

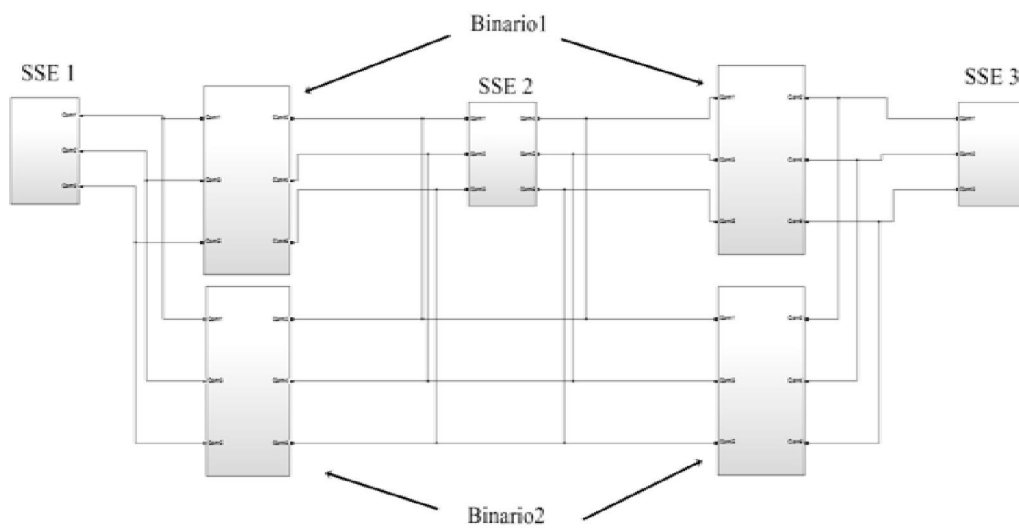


Figura 6.9 Modello medio a tre SSE con alimentazione 2x3kV senza convertitore DC/DC

Infine, costruiti i modelli di riferimento a due e tre SSE, si è quindi passati alla parte relativa alle simulazioni. Anche in questo caso sono state eseguite sia simulazioni statiche, con l'obiettivo di riprodurre una situazione istantanea e osservare le forme d'onda che andavano ad assumere le grandezze di interesse del modello, sia simulazioni dinamiche, per ricavare gli andamenti temporali delle tensioni e delle correnti del sistema.

Le forme d'onda che si andrà ad esaminare sono le stesse viste per il sistema convenzionale a 3 kV in corrente continua.

6.2 Simulazioni statiche di una tratta con alimentazione 2x3kV senza convertitore elettronico di potenza

6.2.1. Caso con due SSE

Il tempo totale per la simulazione è pari a 1s, in modo che il sistema raggiunga le condizioni di regime dopo il transitorio iniziale.

Le tensioni di alimentazione delle SSE presentano un certo ripple dovuto alla presenza del ponte raddrizzatore. Tuttavia la sua entità risulta molto contenuta e non crea grosso disturbo alla rete di alimentazione. Anche in questo caso le linee prima sono sede di caduta di tensione che, comunque, non incide molto sulla tensione di alimentazione. Per questo motivo le due SSE sono alimentate ad una tensione molto prossima a quella nominale (132 kV).

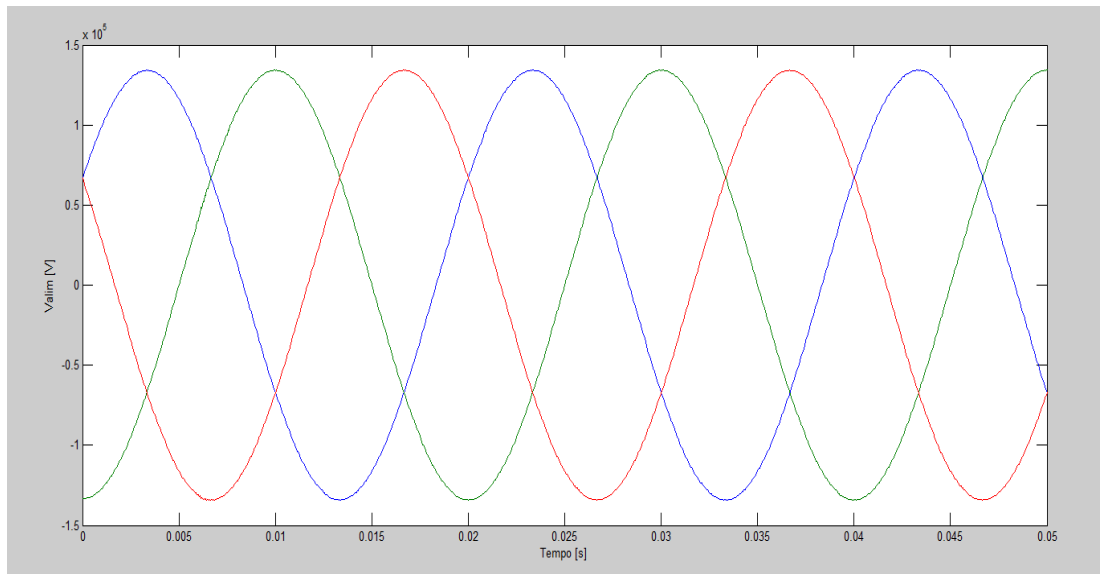


Figura 6.10 Andamento della tensione di alimentazione

La tensione sul carico presenta il seguente andamento:

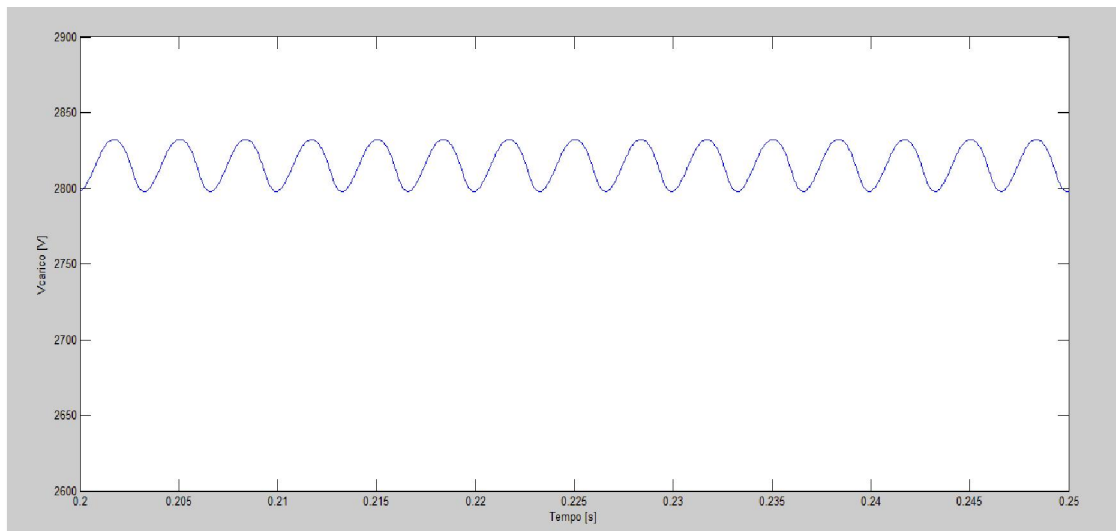


Figura 6.11 Andamento della tensione sul carico

6. IL SISTEMA DI ALIMENTAZIONE 2X3 KV

Il valore ricavato risulta essere più basso rispetto a quello trovato col sistema convenzionale. La tensione è di circa 2828 V contro i 2890 precedenti. Anche il ripple di tensione risulta più rilevante, infatti il contenuto armonico è quello tipico di un raddrizzatore a sei impulsi dove l'armonica con ampiezza maggiore è la sesta.

Le tensioni erogate dalle SSE si presentano invece nel seguente modo:

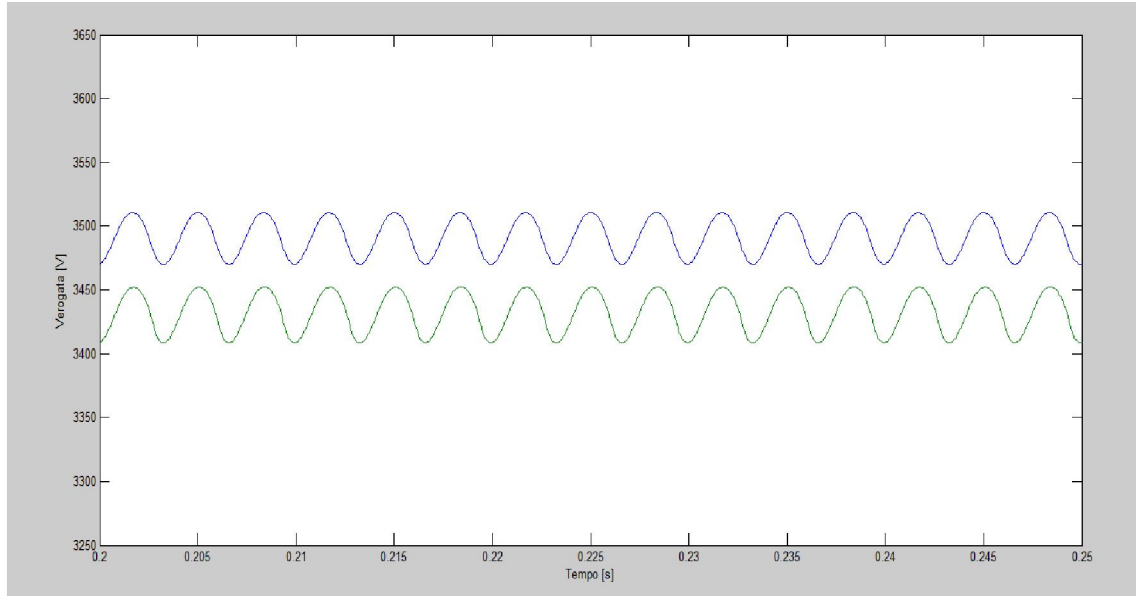


Figura 6.12 Andamento della tensione erogata dalle SSE

I valori delle tensioni erogate risultano inferiori al caso precedente. La SSE di sinistra fornisce una tensione pari a 3498 V mentre quella di destra una tensione di 3446 V. I diversi valori di tensione fra le due SSE sono dovuti alla caduta di tensione nella linea primaria. Il contenuto armonico è sempre quello classico del ponte esafase ovvero 6k.

La configurazione 2x3 kV senza il trasformatore elettronico porta ad avere una maggiore caduta all'interno delle SSE, dovuta alla diversa distribuzione delle correnti all'interno del trasformatore. L'assenza del posto di conversione statica rende completamente inutile il feeder negativo, dato che non è in grado di scambiare energia con la linea di contatto. Se andiamo a ricavare il rendimento di trasmissione si ottiene un valore inferiore rispetto a quello ricavato per il sistema convenzionale. Di seguito è riportata anche la forma d'onda relativa alla corrente erogata dalle SSE.

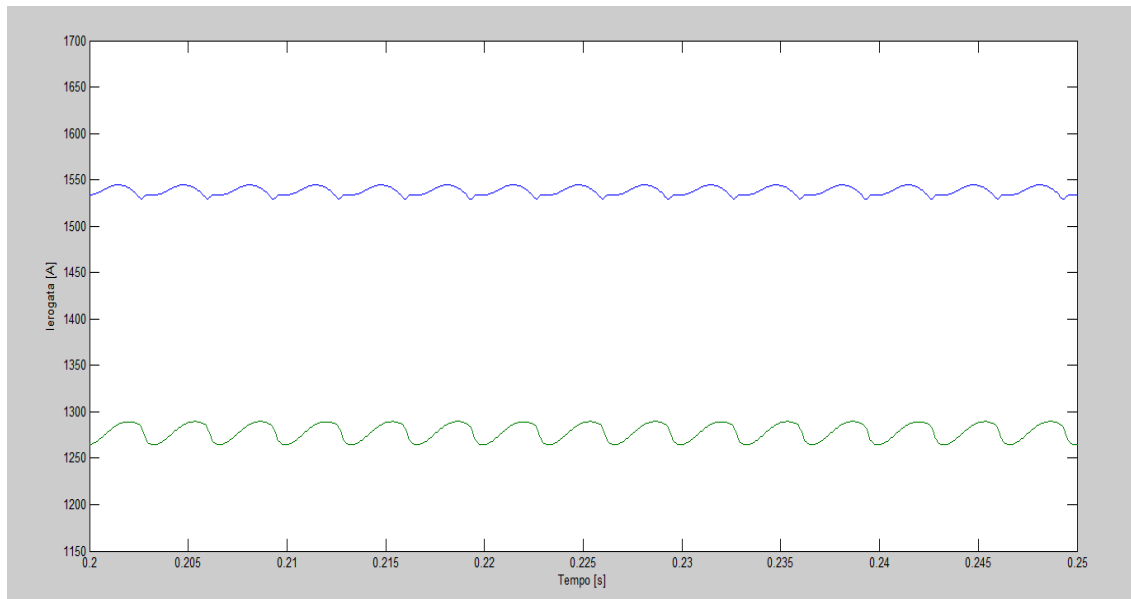


Figura 6.13 Correnti erogate dalle SSE

La corrente erogata dalla SSE di sinistra è pari circa a 1544 A mentre quella erogata dalla SSE di destra è pari a circa 1284 A. Il contenuto armonico, come lo era per le tensioni è quello tipico di un raddrizzatore a sei impulsi.

In questo caso la potenza complessiva erogata dalle SSE è pari a 9,835 MW, mentre quella assorbita dal carico è uguale a 7,995 MW. Questo comporta un rendimento di trasmissione del 0,8129.

6.2.2. Caso con tre SSE

Le tensioni di alimentazione delle SSE presentano sempre un ripple dovuto alla presenza del ponte raddrizzatore (questa volta a sei impulsi). La sua è però molto contenuta e non crea un grosso disturbo alla rete di alimentazione. La presenza delle linee primarie non influisce in modo rilevante per quanto riguarda la caduta di tensione; per tale motivo le SSE sono alimentate ad una tensione molto prossima a quella nominale (132 kV).

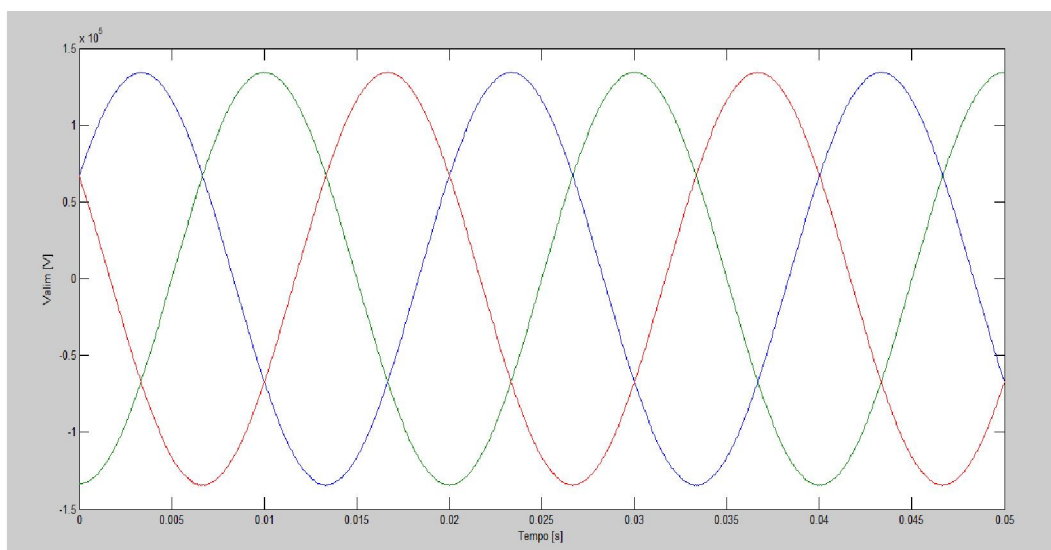


Figura 6.14 Tensione di alimentazione delle SSE

6. IL SISTEMA DI ALIMENTAZIONE 2X3 KV

Le tensioni presenti sui carichi si presentano nel seguente modo:

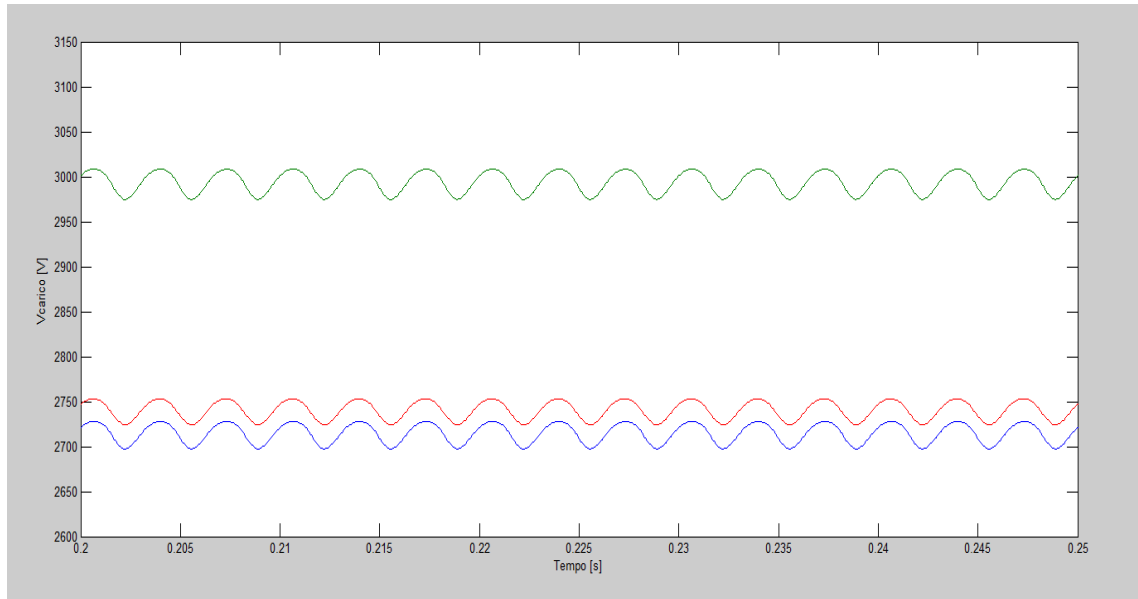


Figura 6.15 Andamento delle tensioni sui carichi

Si riscontrano delle tensioni inferiori rispetto al modello che rappresenta lo stato attuale del sistema ferroviario. Le tensioni dei carichi più importanti (quelli rappresentati con una resistenza di valore 1Ω) si assestano infatti a 2721 e 2747 V, mentre quello da 2Ω è soggetto a una tensione di 2995V.

Anche il ripple risulta essere più elevato, infatti avremo la presenza di una sesta armonica e le sue multiple. I valori di tale armoniche restano comunque molto contenuti.

Le tensioni erogate dalle SSE si presentano invece nel seguente modo:

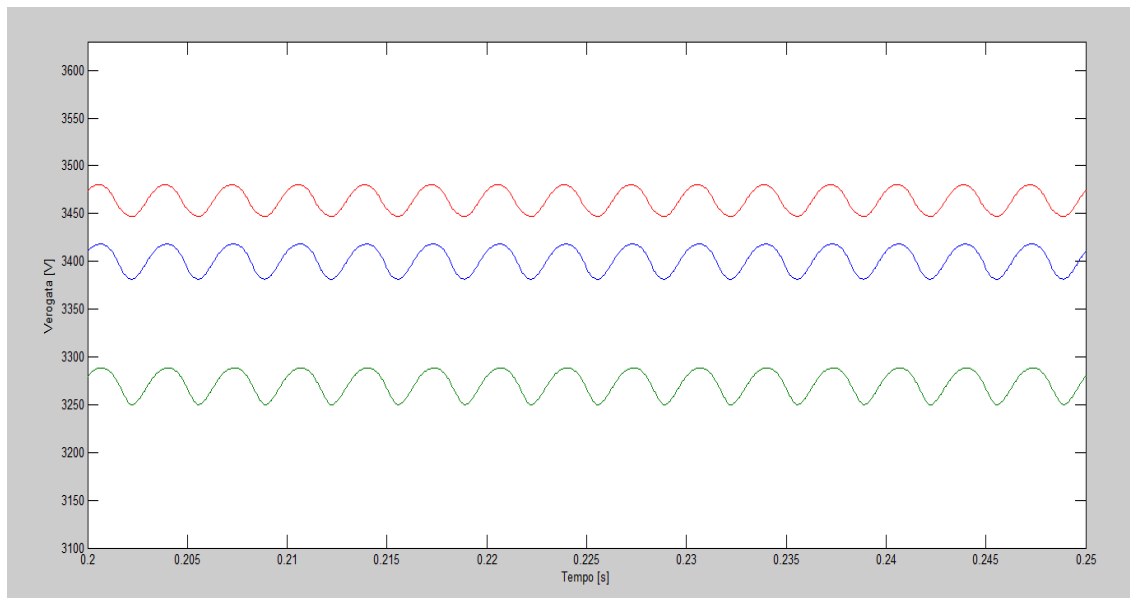


Figura 6.16 Andamento delle tensioni erogate dalle SSE

I valori delle tensioni erogate dalle SSE risultano inferiori rispetto al modello visto in precedenza.

6. IL SISTEMA DI ALIMENTAZIONE 2X3 KV

La SSE di sinistra fornisce infatti una tensione pari a 3410 V, quella centrale è la SSE più caricata infatti presenta una tensione pari a 3280 V, mentre quella di destra eroga 3474 V. Questo è sintomo di una maggiore caduta di tensione interna alla SSE, dovuta alla diversa distribuzione delle correnti all'interno del trasformatore.

L'assenza del posto di conversione statiche rende infatti completamente inutile il feeder negativo, dato che non è in grado di scambiare energia con la linea di contatto. Tutta la corrente viene quindi fornita solo dal ramo del ponte raddrizzatore connesso tra binario e linea di contatto e conseguentemente, le perdite sono localizzate solo sul primario e sul secondario connesso a triangolo. La maggiore caduta di tensione interna alle SSE causa un abbassamento della tensione di linea, con evidenti conseguenze negative sulla qualità dell'alimentazione dei convogli. Interessante risulta anche il ripple della forma d'onda che non è più quello tipico di un raddrizzatore a 12 impulsi, ma si nota la presenza di armoniche a frequenze più basse, in particolare 300 Hz e suoi multipli, caratteristiche di un semplice ponte di Graetz trifase. Questo è giustificato dal fatto che solo un ramo del ponte è effettivamente caricato, determinando la comparsa della sesta armonica e suoi multipli, di entità superiore rispetto al caso precedente, nonostante l'inserzione di un filtro più efficiente.

I diversi valori delle tensioni erogate generano correnti di squilibrio, la cui presenza può essere eliminata andando ad adottare dei variatori sotto carico sui trasformatori abbassatori delle SSE.

Le componenti armoniche presenti sono le stesse viste nell'analisi della tensione esistente sul carico, ma i valori risultano ovviamente superiori, dato il mancato filtraggio operato dall'induttanza della linea. L'armonica più importante è sempre la sesta, il cui valore efficace si assesta intorno ai 20 V. Anche se i valori riscontrati risultano superiori a quelli del modello di riferimento, il contributo al valore efficace della tensione imposta dalle SSE non supera l'1% del valore medio, non costituendo quindi una grande sorgente di disturbo.

Le correnti erogate dalle SSE presentano l'andamento riportato nella figura sottostante.

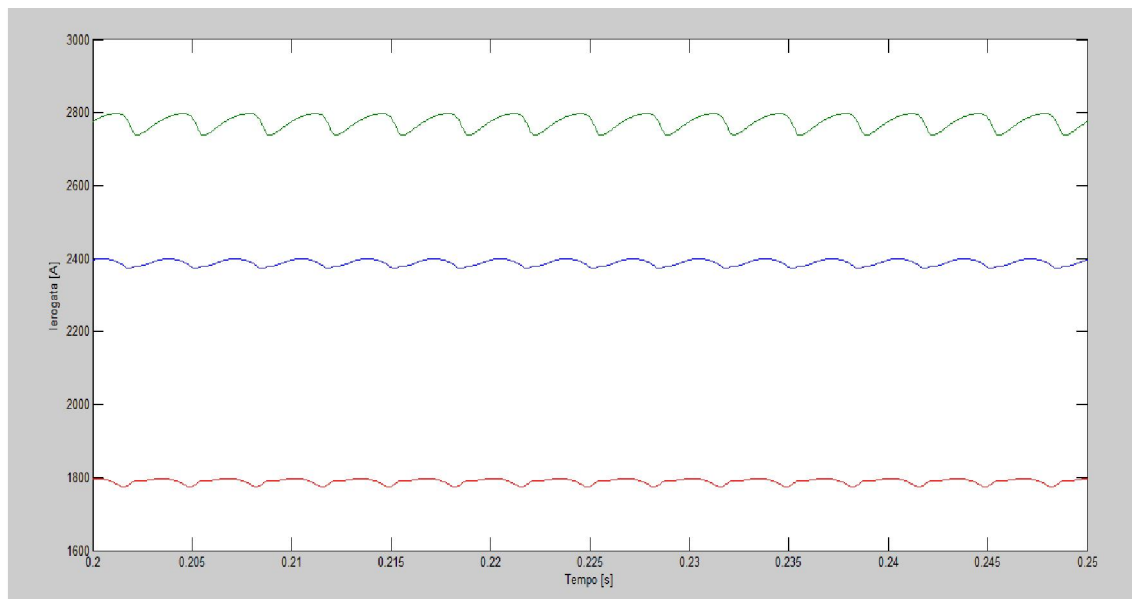


Figura 6.17 Correnti erogate dalle SSE

Il ripple nella corrente erogata è sempre quello tradizionale di un raddrizzatore a sei impulsi. I valori delle correnti erogate dalle SSE sono pari a 2396 A per le SSE di sinistra, che si dividono in 1503 A sul primo binario e 893 A sul secondo binario, 2777 A per quella centrale che si dividono a loro volta in 1222 A sul binario uno nella parte di sinistra e 1164 A nella parte di destra, sul secondo binario troviamo 607 A a sinistra e -216 A a destra (la corrente è entrante nella SSE), infine la SSE di destra eroga 1797 A che si suddividono in 1596 A sul primo binario e i restanti 216 A sul binario due. La differenza nei valori delle correnti erogate è dovuta ad un leggero squilibrio nelle tensioni di alimentazione della linea di contatto e al fatto che la parte sinistra della linea risulta essere più caricata rispetto quella a destra.

6. IL SISTEMA DI ALIMENTAZIONE 2X3 KV

Gli squilibri generano correnti di ricircolo nella parte di linea non caricata. Questi possono essere evitati utilizzando un dispositivo variatore sotto carico per i trasformatori situati nelle SSE.

La sbarra negativa della SSE si porta ad una tensione verso terra di circa -3482 V, valore in modulo più basso dei 3600 V previsti a vuoto. La tensione della sbarra negativa, come quella della sbarra positiva, si porta ad una tensione inferiore rispetto a quella prevista. Infatti la tensione fra catenaria e binario è pari a circa 3350 V inferiore rispetto i 3600 V previsti.

Questo è dovuto alle cadute di tensione interne alla SSE. Il contenuto armonico della tensione negativa è comunque limitato.

Anche in questo caso è stato valutato il rendimento di trasmissione del sistema. Anche se le tensioni di alimentazione sono squilibrate, le correnti presenti sul feeder negativo sono molto contenute e quindi si possono trascurare. Le potenze erogate dalle SSE sono le seguenti:

Tabella 6.1 Valori delle potenze erogate dalle SSE sulle varie linee di contatto

SOTTOSTAZIONE	BINARIO	POTENZA(KW)
Sinistra	1	5.155
Centrale tratta a sinistra	1	4.007
Destra	1	5.543
Sinistra	2	3.059
Centrale tratta a sinistra	2	1.991
Centrale tratta a destra	1	3.817
Totale		23.572

Le potenze assorbite dai carichi sono invece:

Tabella 6.2 Valori delle potenze assorbite dai carichi

TRATTA OCCUPATA	BINARIO	POTENZA(KW)
Sinistra	1	7.376
Sinistra	2	4.326
Destra	1	7.618
Totale		19.320

Il rendimento di trasmissione è pari a 0.8196.

Il nuovo sistema, in queste situazioni, risulta avere caratteristiche peggiori rispetto quello attuale.

6.3 Simulazioni statiche di una tratta con alimentazione 2x3kV con convertitore elettronico di potenza

Prima di andare a vedere i risultati ottenuti dalle simulazioni statiche effettuate sui modelli a due e tre sottostazioni, si va ad introdurre il convertitore DC-DC utilizzato. Il comportamento del convertitore risulta essere simile ad un doppio chopper reversibile. Esso è composto da due interruttori di potenza controllati ai quali sono collegati in parallelo 2 diodi di free-wheeling (nella figura 6.18 è all'interno del IGBT). Il segnale di comando viene generato dal confronto fra l'uscita del regolatore e il segnale a dente di sega. Il convertitore è raffigurato nella figura successiva.

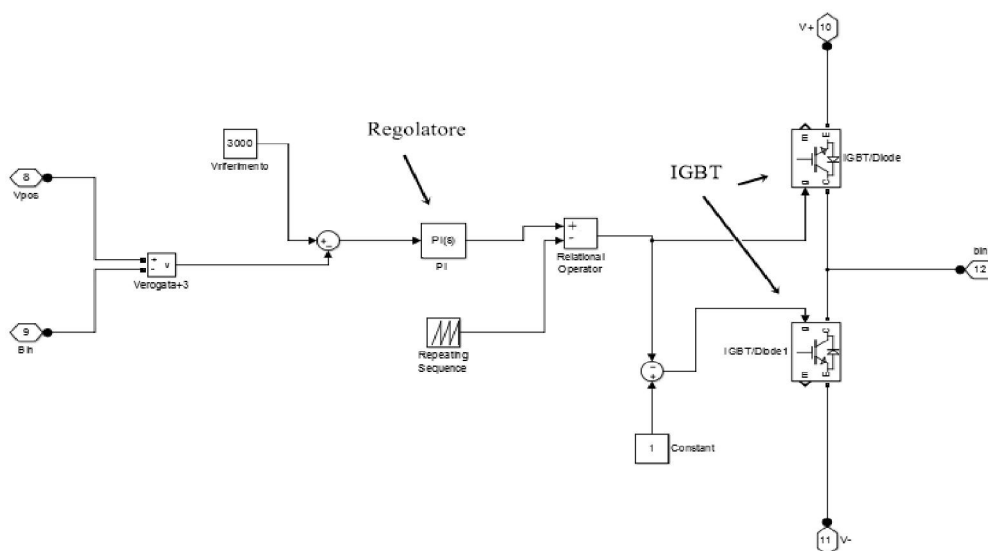


Figura 6.18 Struttura del convertitore DC-DC

6. IL SISTEMA DI ALIMENTAZIONE 2X3 KV

Dalla figura si può vedere come un interruttore sia collegato al polo positivo e l'altro al polo negativo. Nelle simulazioni effettuate, però, si è andati a considerare il convertitori DC-DC in termini medi ovvero si sono inseriti due generatori di corrente pilotati dove questi generatori erogano corrente sia verso la linea di contatto e sia verso il feeder negativo dato che entrambi sono collegati al circuito di ritorno. Il controllo della corrente da erogare si effettua controllando la grandezza in ingresso che in questo caso si tratta della tensione. Il controllo in tensione è in grado di rilevare la tensione rispettivamente della linea di contatto e del binario a metà della tratta considerata e ricava per differenza la tensione di linea effettivamente presente al centro della linea. Poi si confronta il valore misurato con il riferimento di 3000 V. Se la tensione risulta essere sopra il valore di riferimento, allora il controllore non agisce, mentre se scende al di sotto dei 3000 V, allora il controllore PI comanda i generatori in modo tale da riportare la tensione al valore voluto. Il controllo deve dare ai generatori solo valori positivi di comando e spegnersi quando la tensione sale al di sopra del limite imposto, per questo è posto un blocco limitatore in uscita dal PI. Questa configurazione di convertitore DC-DC è riportata di seguito:

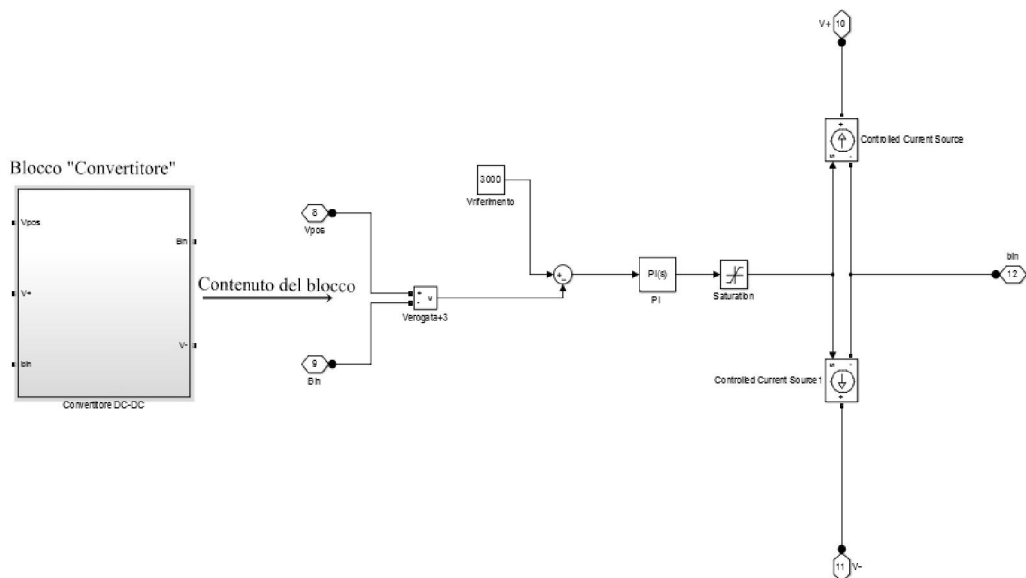


Figura 6.19 Rappresentazione del blocco "Convertitore DC-DC" utilizzato per le simulazioni

Il modello utilizzato per questo tipo di simulazioni è quello di figura 6.5 dato che il blocco relativo al convertitore si trova all'interno del blocco "Binario1".

6.3.1. Caso due SSE

L'andamento della tensione di alimentazione delle SSE è lo stesso di tutti i casi visti in precedenza ovvero presenta un valore di circa 132 kV con un periodo di 0,02 secondi dato che siamo a 50 Hz. L'andamento è il seguente:

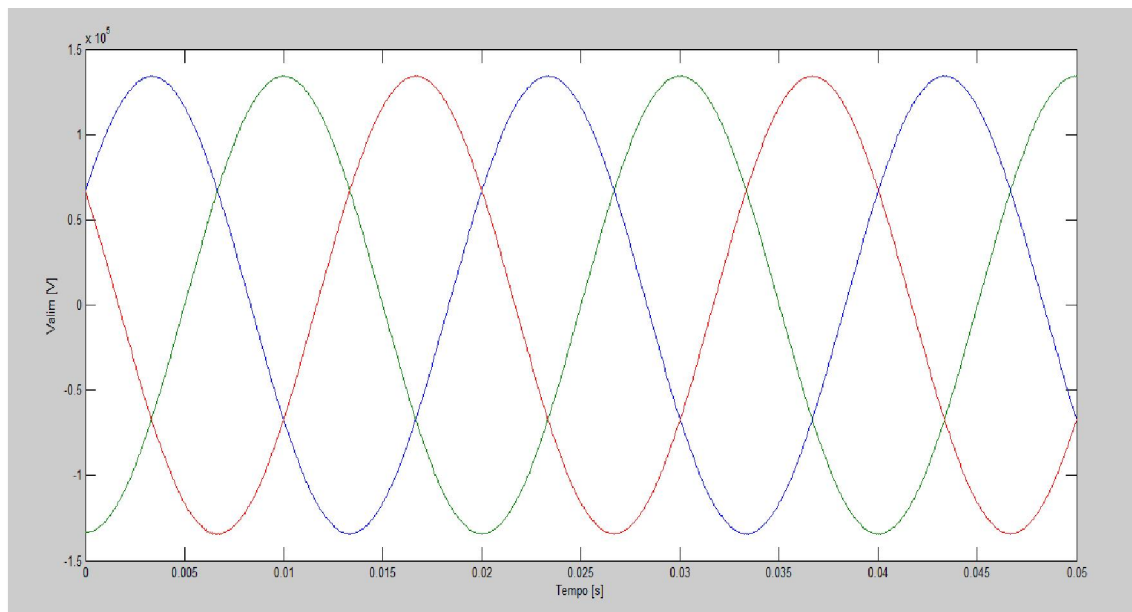


Figura 6.20 Tensione di alimentazione

La tensione sul carico è la seguente:

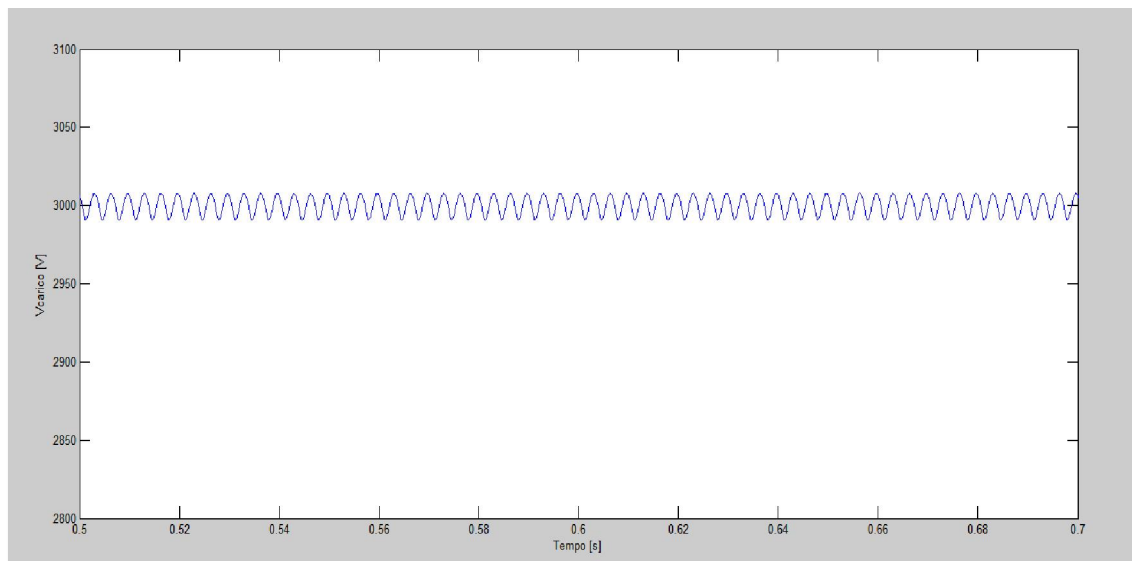


Figura 6.21 Andamento della tensione sul carico

In questo caso si può notare che la tensione si stabilizza ad un valore di circa 3008 V. Questo significa che il dispositivo elettronico funziona in modo corretto dato che si era impostato che la tensione di linea non scendesse mai al di sotto dei 3000 V. Essa presenta un leggero ripple dovuto alla presenza dei raddrizzatori, l'armonica dominante sarà la sesta e non più la dodicesima a causa della diversa configurazione che si utilizza per questo tipo di alimentazione.

Le tensioni erogate dalle SSE si presentano invece nel seguente modo:

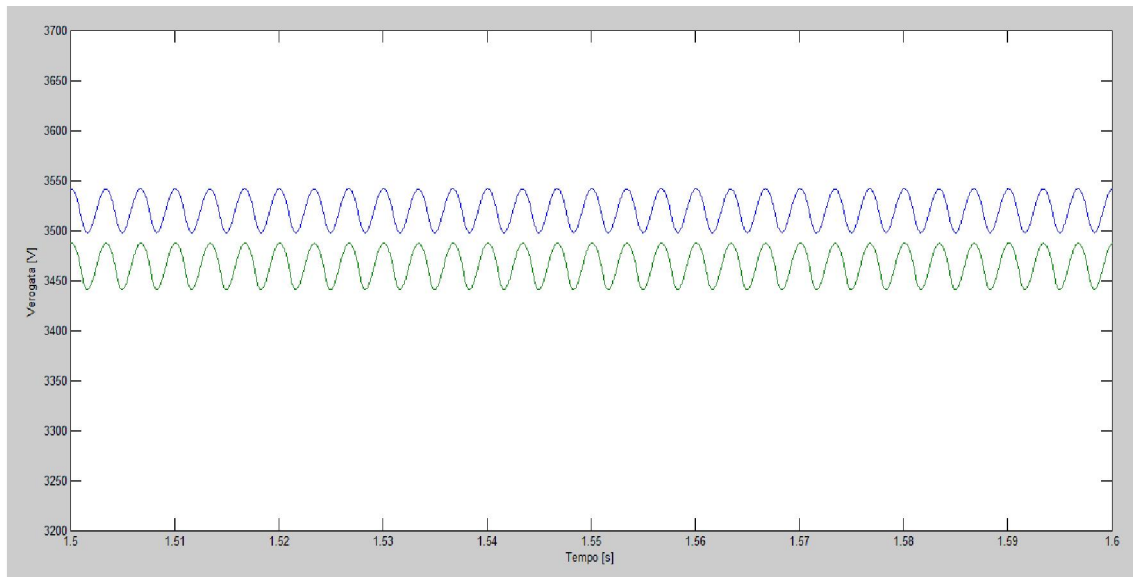


Figura 6.22 Andamento delle tensioni erogate dalle SSE

I valori delle tensioni erogate sono in linea con quelli ricavati per il sistema tradizionale. La sottostazione di destra eroga una tensione di circa 3490 V leggermente inferiore rispetto al valore erogato dalla SSE di sinistra a causa della caduta di tensione nella linea di AT. Quest'ultima eroga una tensione di 3540 V.

Di seguito viene riportato anche l'andamento delle tensioni presenti fra binario e feeder negativo.

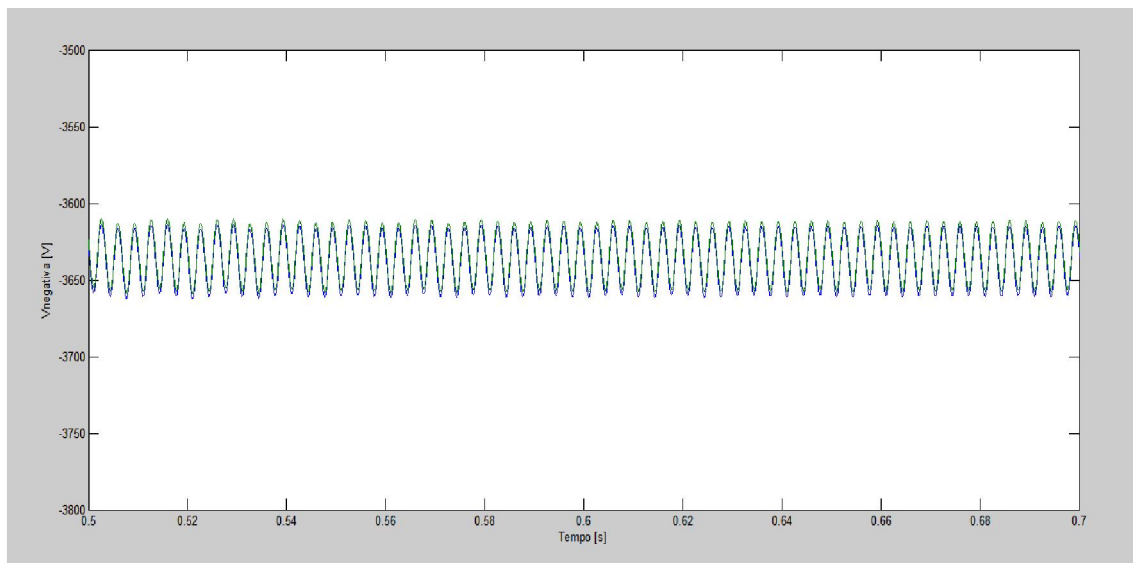


Figura 6.23 Andamento della tensione sulla sbarra negativa

I valori assunti dalle due sbarre sono pressoché uguali, infatti la sbarra di sinistra presenta una tensione di -3618 V (Linea Blu) mentre quella di destra una tensione di -3615 V (Linea Verde).

Anche in questo caso è stato valutato il rendimento di trasmissione. Si è valutata la potenza erogata dalle due SSE che assume un valore di circa 10,45 MW, mentre il carico assorbe una potenza di circa 9.1 MW. In queste condizioni il rendimento di trasmissione è pari a 0,861 superiore rispetto a quello ricavato dal sistema tradizionale

6.3.2. Caso a tre SSE

Per questo tipo di simulazioni si è fatto riferimento al modello di figura 6.8 e, come visto per il caso a due SSE, il convertitore statico si trova all'interno del blocco "Binario". Nella tratta si hanno sempre tre convogli rappresentati da resistenze di valore 1Ω per quelli sul binario uno e 2Ω per il treno sul binario due, oltre ai convogli si sono inseriti 4 trasformatori elettronici. La struttura del convertitore è la stessa utilizzata in precedenza.

Andamento della tensione di alimentazione è la stessa dei casi precedenti e per questo viene ommesso il suo andamento comunque presenta sempre un leggero ripple dovuto alla presenza dei raddrizzatori. Le tensioni rilevate sui carichi presentano il seguente andamento:

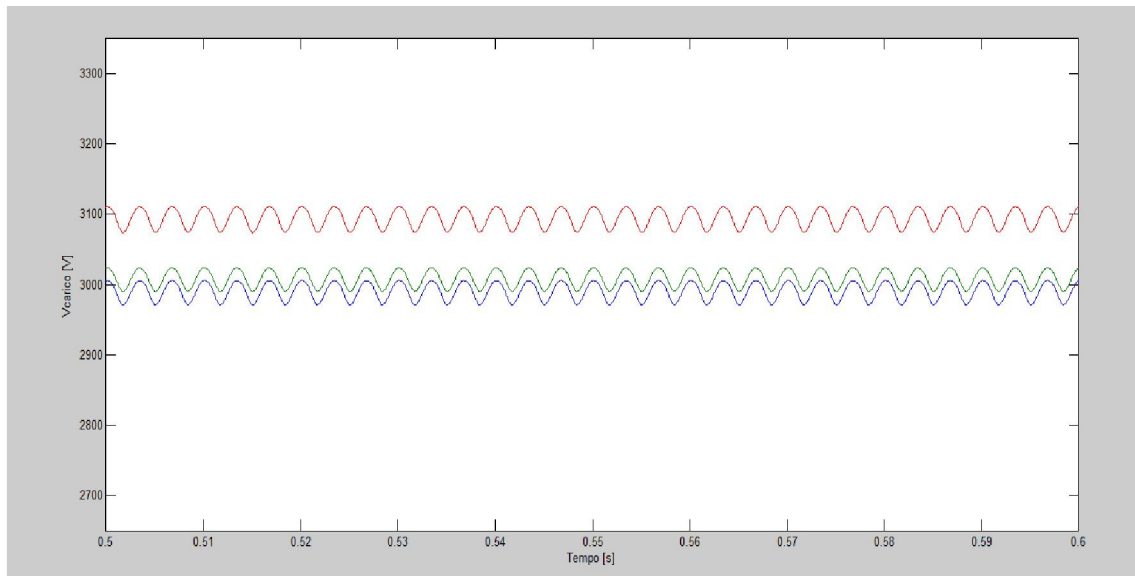


Figura 6.24 Andamento della tensione sui carichi

I valori delle tre tensioni non scendono mai al di sotto dei 3000 V segno che il trasformatore elettronico funziona in modo corretto dato che è controllato in modo che la tensione non scenda mai al di sotto dei 3 kV. Le tensioni sui carichi da 1Ω è pari a circa 3000 V (Linea Verde e Blu) mentre quella del carico da 2Ω è circa 3075 V (Linea rosa).

Le tensioni erogate dalle SSE sono le seguenti:

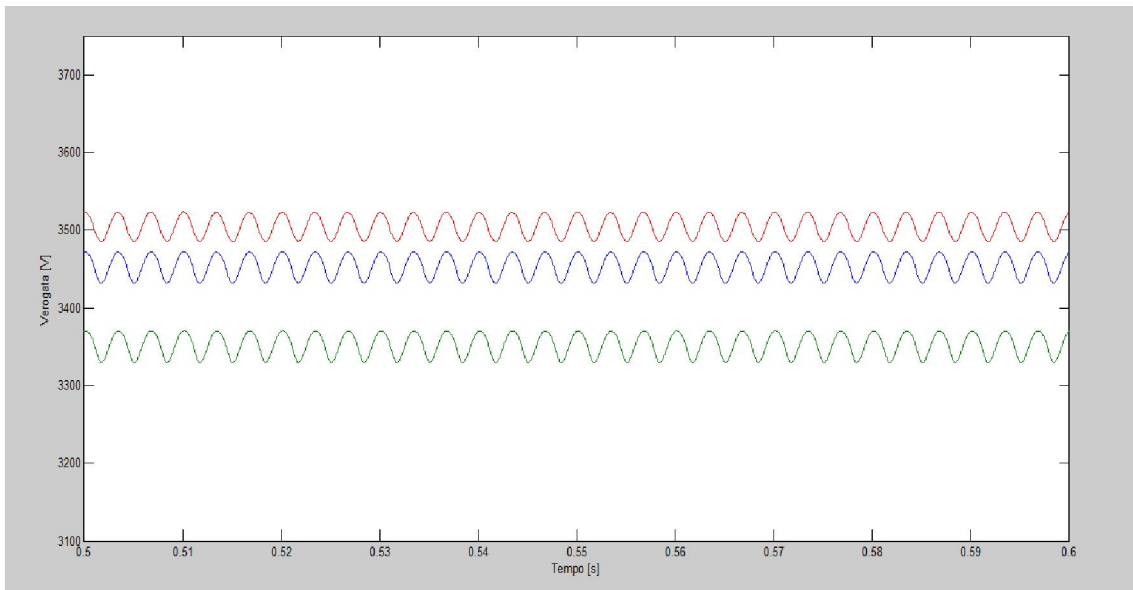


Figura 6.25 Andamento delle tensioni erogate dalle SSE

Anche in questo caso le tensioni sono in linea con quelle del sistema tradizionale, quella più bassa è pari a 3346 V ed è erogata dalla sottostazione centrale che risulta essere la più caricata. La sottostazione di sinistra eroga una tensione pari a 3468 V mentre quella di destra risulta essere pari a 3520 V. Il feeder negativo risulta in questo caso percorso da corrente, scaricando in parte la linea di contatto e riducendo conseguentemente la caduta di tensione in linea. La forma d'onda presenta un ripple, anche sono presenti due raddrizzatori a sei impulsi connessi in serie, classico di un ponte di Graetz trifase, avendo armoniche multiple della sesta.

Le correnti erogate dalle SSE sono le seguenti:

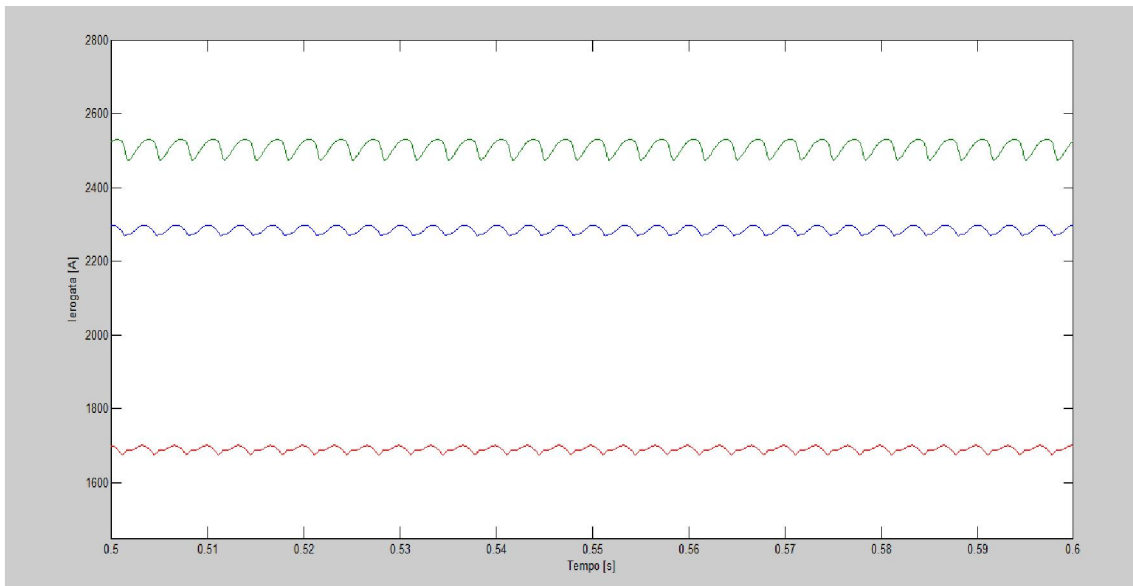


Figura 6.26 Andamento delle correnti erogate dalle SSE

La sottostazione di destra eroga una corrente pari a circa 1701 A e risulta essere la più bassa, mentre la SSE centrale eroga la corrente più alta che è pari a circa 2520 A.

6. IL SISTEMA DI ALIMENTAZIONE 2X3 KV

Infine la sottostazione di sinistra eroga una corrente di 2297 A. Anche le correnti presentano un ripple classico di un raddrizzatore a sei impulsi presentando armoniche di ordine $6k \pm 1$, quelle di ampiezza maggiore sono la quinta e la settima.

Le tensione sulla sbarra negativa presentano il seguente andamento:

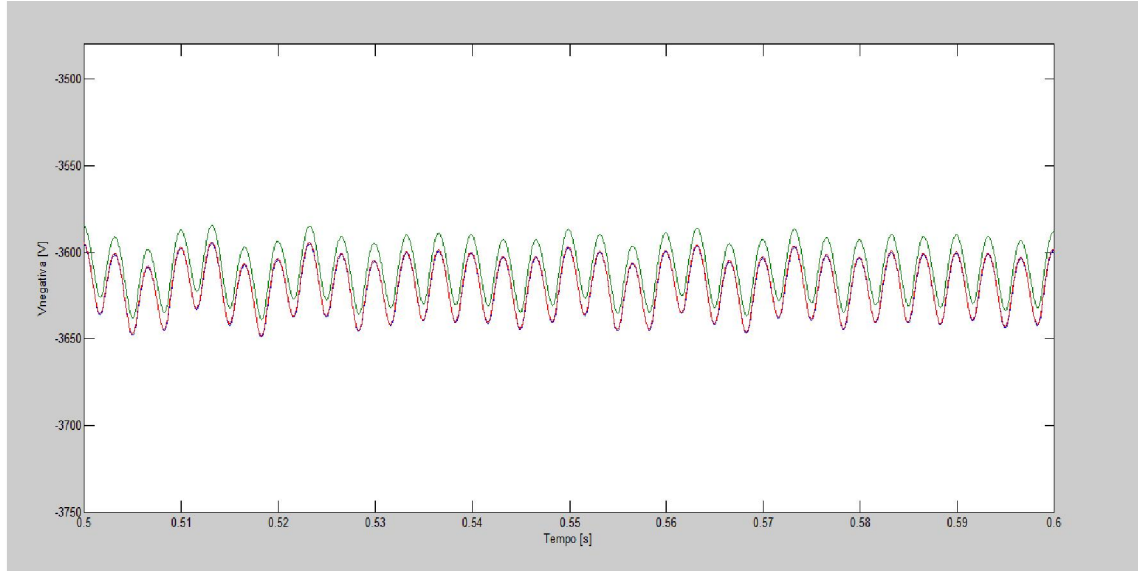


Figura 6.27 Andamento della tensione nella sbarra negativa

I valori assunti dalle 3 tensioni sono molto simili. La sbarra negativa della SSE di destra si porta a -3600 V mentre quella centrale a -3591 V, infine quella di sinistra si porta al potenziale negativo di -3602 V. I valori sono inferiori rispetto al caso precedente e a quello senza il convertitore elettronico di potenza.

Anche in questo caso si è valutato il rendimento di trasmissione calcolando la potenza totale erogata dalle sottostazioni che è pari a 25,492 MW mentre la potenza totale assorbita dai convogli è pari a 22,328, quindi il rendimento di trasmissione è pari a circa 0,875 superiore a quello del sistema tradizionale a 3 kV in corrente continua.

Una volta calcolati i rendimenti di trasmissione per il nuovo sistema, si sono confrontati i risultati col sistema tradizionale. In tabella 6.1 è riportato il confronto nel caso con due sottostazioni mentre nella tabella 6.2 è riportato quello del caso a tre SSE.

Tabella 6.1 Valori dei rendimenti dei modelli a due SSE

Tipologia di alimentazione	Rendimento di trasmissione
Sistema tradizionale	0,813
Sistema 2 x 3 kV senza convertitore	0,809
Sistema 2 x 3 kV con convertitore	0,861

Tabella 6.2 Valori dei rendimenti dei modelli a tre SSE

Tipologia di alimentazione	Rendimento di trasmissione
Sistema tradizionale	0,825
Sistema 2 x 3 kV senza convertitore	0,816
Sistema 2 x 3 kV con convertitore	0,875

Dalle tabelle si può notare che il nuovo sistema presenta un rendimento di trasmissione maggiore rispetto al sistema attuale quando è presente in convertitore DC-DC mentre il rendimento risulta essere leggermente inferiore nel caso non sia presente il posto di conversione.

Si riscontra però un leggero aumento del contenuto armonico nella tensione, dovuto al funzionamento in serie dei due ponti raddrizzatori e alla presenza del posto di conversione. Tuttavia i valori delle armoniche risultano essere abbastanza contenuti.

6.4 Simulazioni dinamiche di una tratta con alimentazione 2x3 kV con convertitore elettronico di potenza

Per le simulazioni dinamiche si è fatto riferimento alle formule introdotte nel capitolo 4, assumendo un valore medio di tensione erogata dalle SSE e un assorbimento medio costante di corrente da parte dei convogli. Per questo tipo di simulazioni, come fatto per il sistema tradizionale, si va ad analizzare solo la tratta costituita da due sottostazioni nel caso in cui vi sia un treno nel binario uno oppure un treno nel primo binario e un treno nel secondo binario

Passiamo ora ai risultati ottenuti dalle simulazioni

6.4.1 Caso due SSE con la presenza di un carico dinamico

Per la simulazione dinamica, come per il sistema tradizionale, il convoglio viene rappresentato con una serie di generatori di corrente pilotati (figura 6.28) che vengono opportunamente installati lungo la linea.

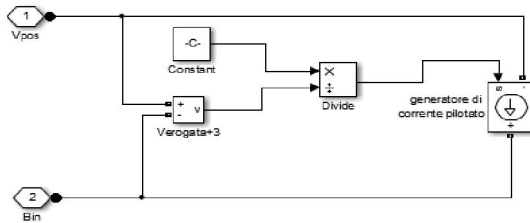


Figura 6.28 Rappresentazione del treno nei modelli dinamici

Per il calcolo della caduta di tensione in linea si è assunto un valore medio della tensione erogata dalle due SSE e supposto identico per entrambe 3480 V e un assorbimento medio di corrente da parte del treno lungo la tratta considerata che è pari a 2950 A. Infine utilizzando la formula 4.36 si è calcolato la caduta di tensione e poi la tensione presente nella linea di contatto. Il suo andamento è riportato in figura 6.29

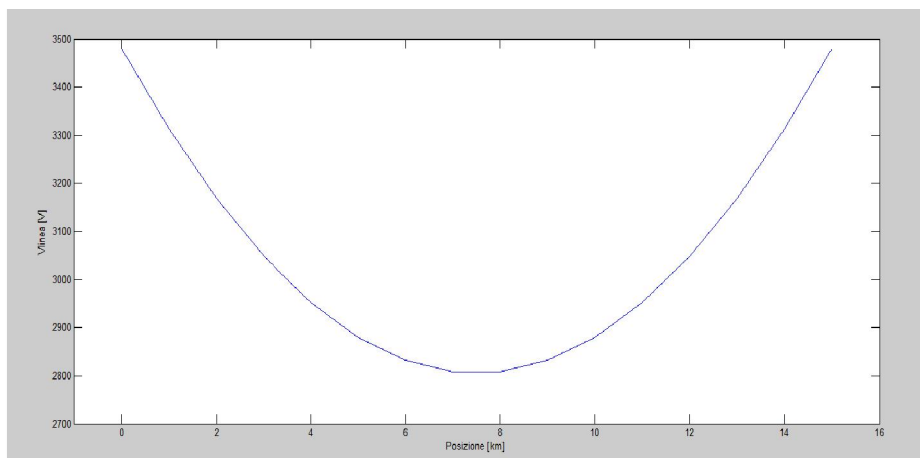


Figura 6.28 Andamento della tensione lungo la linea di contatto

6. IL SISTEMA DI ALIMENTAZIONE 2X3 KV

Dalla figura si può vedere che la tensione presenta un andamento parabolico e il minimo lo assume al centro della tratta considerata. In tale punto la tensione è di circa 2810 V, valore superiore rispetto a quello trovato per il sistema a 3 kV. Di seguito viene riportato anche l'andamento della potenza assorbita dal convoglio.

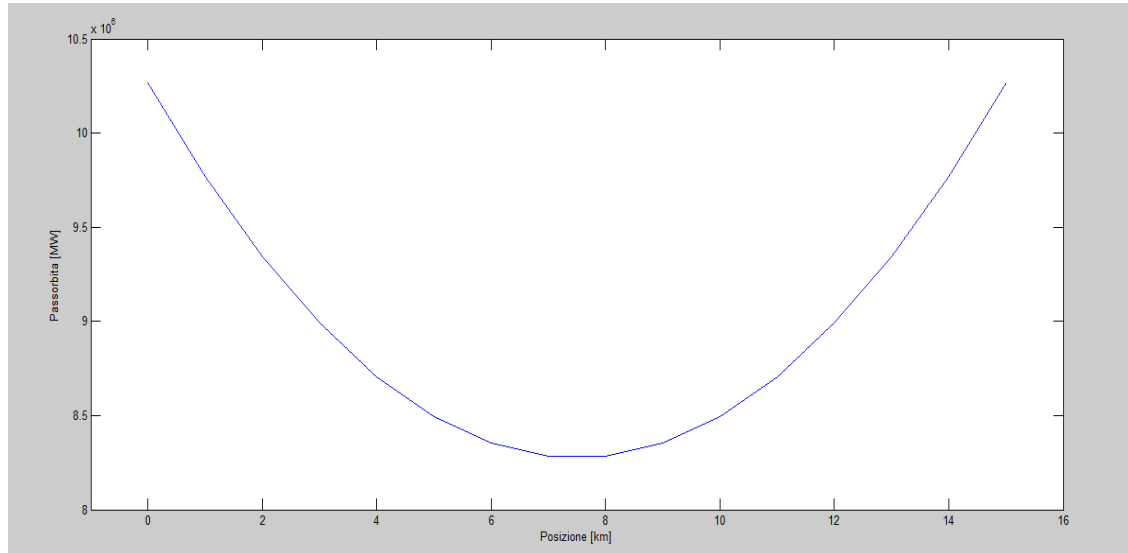


Figura 6.29 Andamento della potenza assorbita dal convoglio

L'andamento è analogo a quello della tensione dato che si è considerato un assorbimento medio di corrente da parte del convoglio lungo il percorso considerato. Valore minimo assunto dalla potenza è di circa 8,28 MW mentre il valore medio è pari a 9,1 MW. Di seguito viene riportato anche l'andamento della corrente erogata dalle sottostazione di sinistra

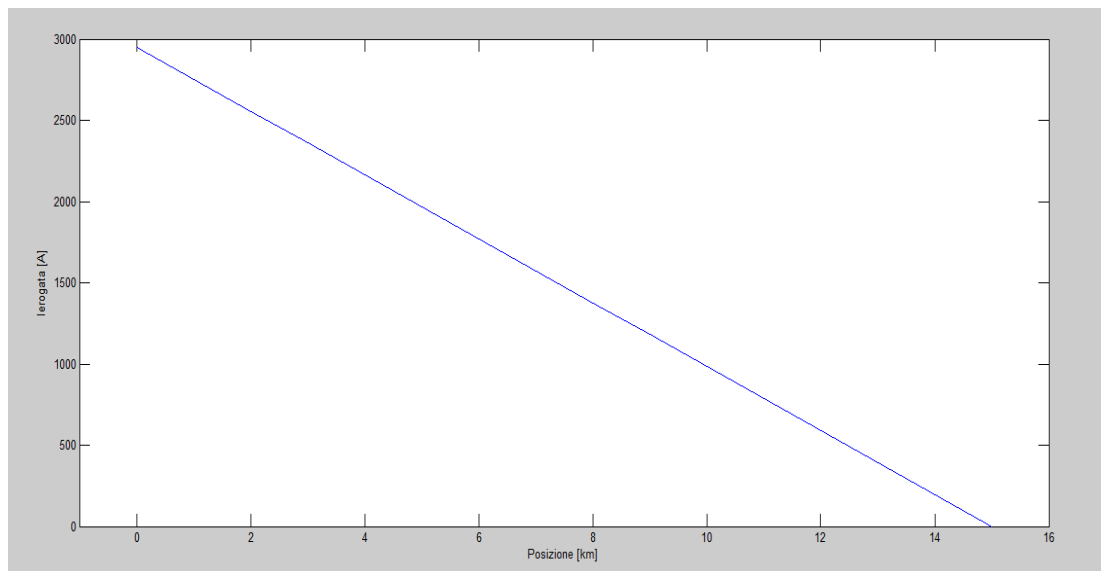


Figura 6.30 Andamento della corrente erogata dalla SSE di sinistra

La corrente è massima in prossimità della SSE ($x = 0$) e diminuisce linearmente fino ad annullarsi per $x = 15$ ovvero in corrispondenza della SSE di destra.

In definitiva, per questo caso, si può affermare che il nuovo sistema porta ad avere un valore di tensione lungo la linea di contatto maggiore rispetto al sistema tradizionale e quindi riduce la caduta di tensione in linea e aumenta la potenzialità della linea stessa.

6.4.1 Caso due SSE con la presenza di due carichi dinamici

Lo stesso ragionamento del caso precedente si è fatto anche per questa simulazione. Consideriamo sempre un assorbimento medio di corrente da parte dei convogli, il primo assorbe una corrente pari a 2950 A mentre il secondo di 2900 A. Il modello utilizzato è quello del caso precedente.

La tensione lungo le linee di contatto è la seguente:

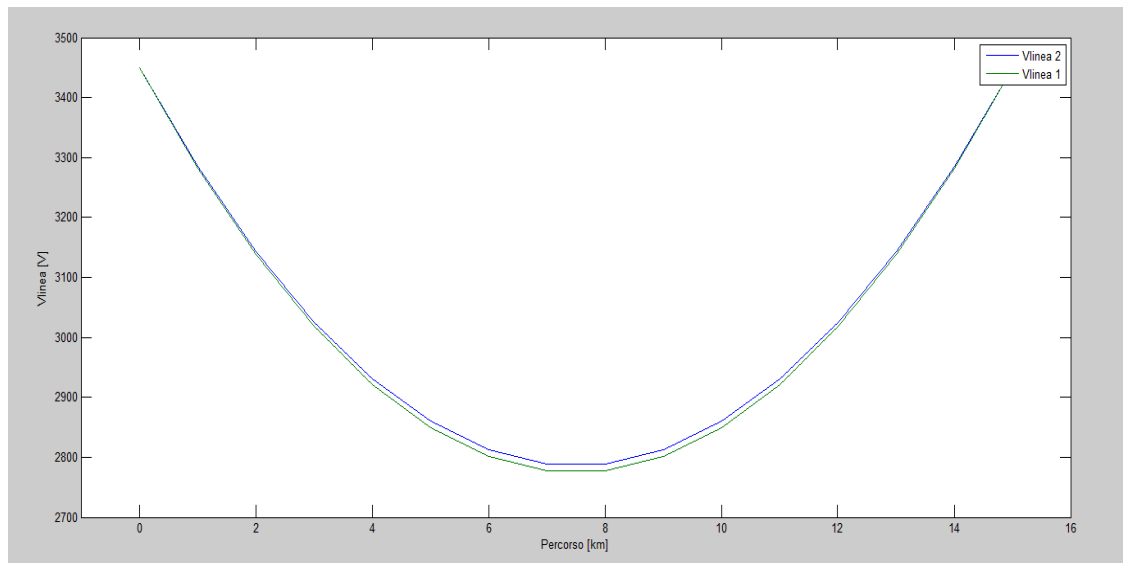


Figura 6.33 Andamento della tensione lungo le linee di contatto

Dalla figura possiamo vedere che le due tensioni risultano essere leggermente differenti a causa del diverso valore delle correnti assorbite dai convogli.

Come per il caso precedente la tensione presenta un minimo a metà della tratta dove la tensione sulla prima linea di contatto è di circa 2778 V (Curva verde) mentre sulla seconda linea la tensione vale circa 2788 V (Curva blu).

6. IL SISTEMA DI ALIMENTAZIONE 2X3 KV

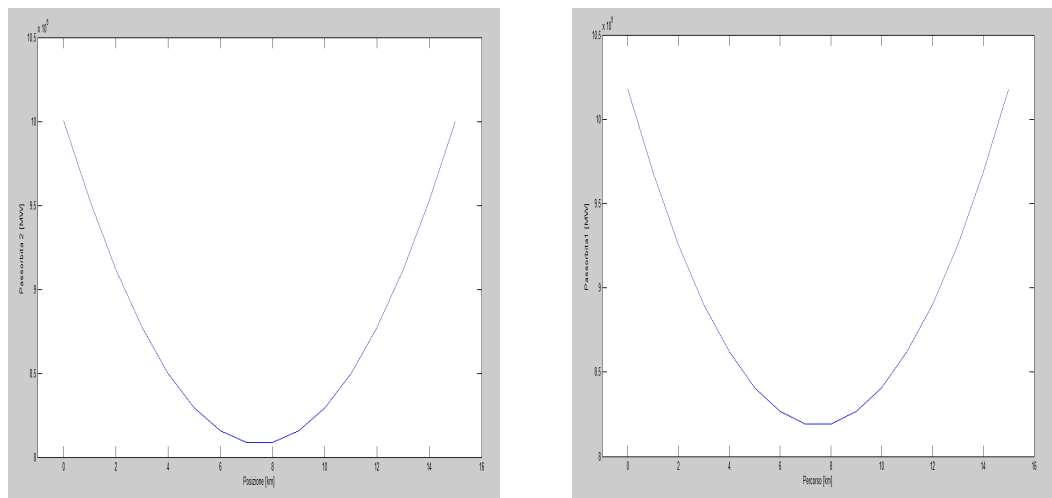


Figura 6.34 Andamento della potenza assorbita dai convogli

Dalla figura di sinistra si può vedere che il convoglio nel binario uno assorbe una potenza media di circa 9,2 MW, il punto di minimo è a metà della tratta dove la potenza è di circa 8,2 MW. Mentre dalla figura di destra si può vedere che il convoglio nel binario due assorbe una potenza media di circa 9 MW, nel punto di minimo la potenza vale circa 8,1 MW.

Anche per questo caso il nuovo sistema si comporta in modo da ridurre la caduta di tensione in linea e aumentare la potenzialità della linea stessa. Infine si riporta la potenza assorbita da entrambi i convogli

7. Conclusioni

Le simulazioni effettuate prima sui modelli rappresentanti il sistema di alimentazione attuale e successivamente su quelli provvisti del sistema 2x3 kV in corrente continua hanno messo in evidenza le loro diverse caratteristiche, portando ad affermare una superiorità del nuovo sistema rispetto a quello tradizionale almeno in termini di aumento della potenzialità delle tratte e di miglioramento della qualità di alimentazione. Infatti, se consideriamo il modello a due SSE con la presenza di un carico che si muove lungo la tratta si è visto che la tensione minima col sistema attuale è pari 2780 V, invece, col sistema nuovo (assumendo sempre un valore medio di tensione erogata dalle SSE) è di circa 2810 V. Per poter affermare la netta superiorità del nuovo sistema rispetto a quello attuale e a quello Alta Velocità / Alta Capacità bisognerebbe eseguire molte altre valutazioni, per esempio un'analisi in regime di guasto per valutare l'entità delle correnti di corto circuito presenti in linea e scegliere le opportune protezioni che estinguano il guasto nel minor tempo possibile, oppure una valutazione di tipo economico o impiantistico (affidabilità del sistema) che non sono oggetto di questo lavoro.

Bibliografia

- [1] V. Finzi, Trazione elettrica linee primarie e sottostazioni, Genova: Coedit, 2002.
- [2] L. Mayer, Impianti ferroviari, Roma: Collegio Ingegneri Ferroviari Italiani, 1993.
- [3] V. Finzi e D. Cervetto, Trazione elettrica linee di contatto, Genova: Coedit, 2003.
- [4] V. Finzi, Impianti di sicurezza, Genova: Coedit, 2001.
- [5] J. I. Prada Vázquez, Sistema de electrificación ferroviaria 2 X 3000 V, Madrid, 2009.
- [6] Appunti del corso di "Sistemi elettrici per i trasporti"
- [7] V. Castagna, «Nuovo modello di calcolo per l'analisi a regime dei sistemi di Trazione elettrica a c.c. e c.a.,» *L'ingegneria ferroviaria*, pp. 1031 - 1043, dicembre 2004.
- [8] Mohan, Undeland, Robbins, ELETTRONICA DI POTENZA: Hoepli, 2005.
- [9] S. Bottin (2013), Analisi di un sistema di alimentazione innovativo per reti ferroviarie in corrente continua tramite software EMTP-RV (magistrali biennali)
- [10] F. Perticaroli, Sistemi elettrici per i trasporti, CEA, 2001